

2º CICLO DE ESTUDO

RISCOS, CIDADES E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO

Suscetibilidade à Ocorrência de Movimentos de Vertente na  
RDD: *Drones*, Modelos Digitais de Elevação, Algoritmos de  
Modelação Hidrológica e Modelo Matemático de Base Física  
e Estatística – SHALSTAB

Miguel Ângelo Vieira Mendonça

**M**

**2017**



**Miguel Ângelo Vieira Mendonça**

**Suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente na RDD:  
*Drones*, Modelos Digitais de Elevação, Algoritmos de Modelação  
Hidrológica e modelo matemático de base física e estatística -  
**SHALSTAB****

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em Riscos, Cidades e Ordenamento do  
Território, orientada pelo Professor Doutor Carlos Bateira

Faculdade de Letras da Universidade do Porto

Novembro de 2017



**Suscetibilidade à Ocorrência de Movimentos de Vertente na RDD:  
*Drones, Modelos Digitais de Elevação, Algoritmos de Modelação*  
*Hidrológica e Modelo Matemático de Base Física e Estatística -*  
**SHALSTAB****

Miguel Ângelo Vieira Mendonça

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em Riscos, Cidade e Ordenamento do  
Território, orientada pelo Professor Doutor Carlos Bateira.

**Membros do Júri**

Professora Doutora Fátima Matos  
Faculdade de Letras da Universidade do Porto

Professor Doutor Carlos Bateira  
Faculdade de Letras da Universidade do Porto

Professora Doutora Laura Soares  
Faculdade de Letras da Universidade do Porto

Classificação obtida: 17 valores

*À minha família,*



# Índice Geral

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>vi</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>viii</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>ix</b>
<b>Índice de Tabelas</b> .....	<b>xii</b>
<b>ACRÓNIMOS E SÍMBOLOS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>INTRODUÇÃO E OBJETIVOS</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1 – ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>4</b>
1. Região Demarcada do Douro .....	4
2. A instabilidade de vertentes na RDD.....	5
3. Áreas de estudo.....	7
4. Litologia .....	8
<b>CAPÍTULO 2 – ENQUADRAMENTO CONCEPTUAL</b> .....	<b>10</b>
1. Detecção Remota.....	10
1.1. Drones.....	12
1.2. SfM (Structure from Motion).....	15
2. Modelos Digitais de Elevação.....	22
3. Enquadramento Teórico do Conceito “Risco”; Movimentos de Vertente; Algoritmos de Modelação Hidrológica .....	24
3.1. Conceito de Risco .....	24
3.2 Movimentos de vertente.....	26
3.2.1. Classificação de movimentos de vertente .....	26
3.2.2. Tipos de movimento de vertente .....	29
3.2.3. Fatores desencadeantes de movimentos de vertente .....	34
3.2.4. Estabilidade e rutura de vertentes .....	35
3.3. Algoritmos de Modelação hidrológica .....	38
3.3.1. Algoritmo Determinístico 8 ( <i>deterministic eight-neighbors</i> ).....	39
3.3.2. Algoritmo $D^\infty$ ( <i>deterministic infinity</i> ).....	40
3.3.3. Algoritmo MFD (multiple flow direction) .....	41
4. Metodologias de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente. ....	43
4.1. Modelo matemático de Base Física – SHALSTAB .....	44
4.1.1. Modelo de estabilidade .....	45
4.1.2. Modelo Hidrológico .....	46
4.1.3. Combinação de modelos .....	48

4.3.4. Procedimento de validação do modelo de suscetibilidade .....	51
<b>CAPÍTULO 3 - PROCESSAMENTO DOS DADOS E METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO .....</b>	<b>53</b>
1. Fotografias aéreas .....	53
2. Fluxograma de trabalho .....	53
3. Obtenção de dados para metodologia.....	55
4. Modelos Digitais de Elevação da Quinta do Bomfim .....	55
5. Processamento dos MDE's de Suscetibilidade da Quinta das Carvalhas .....	59
5.1. Fatores topográficos .....	59
5.1.1 Declividade da Quinta das Carvalhas.....	59
5.1.2. Áreas contributivas da Quinta das Carvalhas .....	65
5.1.2.1. Algoritmo D8 ( <i>por resolução</i> ).....	69
5.1.2.2. Algoritmo D $\infty$ ( <i>por resolução</i> ) .....	70
5.1.2.3. Algoritmo MFD ( <i>por resolução</i> ).....	71
5.1.2.4. Comparação aerofotogramas de 20cm vs 50cm .....	71
5.1.2.5. Comparação entre algoritmos (D8, D $\infty$ , MFD) .....	75
5.2. Parâmetros físicos .....	77
5.2.1 Peso específico do solo.....	78
5.2.2 Condutividade hidráulica.....	78
5.2.3. Espessura do solo .....	80
5.2.4. Ângulo de atrito interno .....	80
5.2.5. Coesão do solo.....	81
<b>CAPÍTULO 4 – MODELAÇÕES DA SUSCETIBILIDADE, VALIDAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS</b>	<b>82</b>
1. Simulação da Suscetibilidade .....	82
1.1. Modelação A (Resolução espacial de 0,20m).....	83
1.2. Modelação B (Resolução espacial de 0,40m).....	84
1.3. Modelação C (Resolução espacial de 1m).....	85
1.4. Modelação D (Resolução espacial de 2m).....	86
1.5. Modelação E (Resolução espacial de 5m) .....	87
1.7. Modelação G (Resolução espacial de 5m da Municipia).....	89
2. Validação das Modelações de Suscetibilidade.....	91
3. Comparação das Modelações de Suscetibilidade .....	91
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>96</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>100</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>110</b>



## AGRADECIMENTOS

Ao longo da elaboração da presente dissertação pude contar com apoio direto e indireto de múltiplas pessoas e entidades, às quais estou profundamente grato. Correndo o risco de não mencionar alguém, injustamente, quero expressar o meu sincero e profundo agradecimento a todos.

Começo pelo orientador desta dissertação, o Professor Doutor Carlos Bateira, nomeadamente pelo tempo cedido, pelos incentivos, pela paciência, disponibilidade e apoio que sempre demonstrou. O seu gosto e experiência pelos riscos naturais revelaram-se determinantes no desenrolar do processo. Aqui expresso a minha gratidão para consigo.

Referindo-me ao professor não poderia deixar de referir os seus “coadjuvantes”. À Joana Fernandes, António Costa, André Oliveira e Bruno Felizardo um grande obrigado pelo constante incentivo, pela inserção num meio em que não estava habituado, pelos ensinamentos que transmitiram, palavras de motivação, auxílio prestado, dúvidas esclarecidas e por pequenos mas bons momentos que não me esquecerei. Obtiveram o meu respeito simplesmente pela solidariedade que transmitem a quem vos procura.

Quero congratular o pessoal e entidades que unem esforços visando o desenvolvimento do Projeto CloudMapper, plataforma através da qual pude obter enorme conhecimento sobre o tema em questão. Gostaria de agradecer à Quinta do Bomfim e a todos os seus funcionários pelo serviço oferecido, nomeadamente nas saídas de campo. Foram momentos cansativos mas de enorme diversão, trabalho e partilha de experiências.

Expresso um sentido agradecimento à minha namorada, Marta Cristina, pelo apoio, carinho, sentimento, auxílio, disponibilidade, incentivo e amor demonstrado em momentos mais frágeis. És uma peça essencial para que mantenha a cabeça erguida.

Agradeço profundamente à minha madrinha, pela preocupação demonstrada, aos inúmeros telefonemas e sua bondade. É um anjo da guarda na terra.

Finalmente e de extrema importância, à minha família. Ao meu pai, minha mãe e minha irmã, sem vocês, era impossível. A vossa vida inspira-me a novos horizontes. Obrigado por me possibilitarem a realização deste sonho. Obrigado por tudo o que me deram na vida. São a minha razão de viver. O nosso caminho continua, graças às vossas pisadas. Um eterno obrigado.

## RESUMO

**Palavras-chave:** RDD; Movimento Vertente; SHALSTAB; Suscetibilidade;

Uma pequena fração deste estudo dedica-se à Quinta do Bomfim e à análise de diversos tipos de MDE's, uns criados de base a partir dos pontos cotados e curvas de nível e outros manipulados a partir do MDE (0,20m para 0,4m, 1m, 2m e 5m respetivamente) que se denominaram de "generalizados".

A presente dissertação pretende estudar os processos de instabilidade de taludes na Região Demarcada do Douro (RDD), nomeadamente na Quinta das Carvalhas. Visa a aplicação do modelo matemático de base física SHALSTAB, socorrendo-se de várias modelações de componente hidrológica e de componente física, para gerar vários cenários de simulação da instabilidade.

A modelação foi executada tendo como base a construção de 5 Modelos Digitais de Elevação (MDE) derivados de fotografias aéreas da Spin.Works. Foram ainda utilizados mais 2 MDEs provenientes da Municipia. A Spin.works capturou fotografias aéreas a uma altitude de 100m, elaborando MDE's com 20cm de equidistância. A empresa Municipia elaborou voos a 5000m de altitude com intuito de produção de MDE's com equidistância de 50cm.

Os modelos referidos, com resoluções espaciais distintas (0,20m; 0,40m; 1m; 2m; 5m) foram alvo de comparação de resultados, de modo a demonstrar os que melhor se ajustam à definição dos processos de instabilidade em taludes de patamares agrícolas. O inventário dos deslizamentos da Quinta das Carvalhas foi obtido através do trabalho já desenvolvido pela equipa do projeto CloudMapper, sendo que a validação dos resultados tem o inventário como base. Os dados dos parâmetros físicos para a modelação do SHALSTAB foram aplicados no presente trabalho após investigação em laboratório. Paralelamente foram feitas experiências no terreno, para a Quinta das Carvalhas: à resistividade elétrica, condutividade hidráulica, textura do solo e capacidade de infiltração.

A análise de diferentes resoluções permite uma melhor análise, pois são desenvolvidos vários cenários que possibilitam uma avaliação individual e conjunta.

O algoritmo utilizado na modelação hidrológica foi *Multiple Flow Direction – MFD* de Quinn *et al.*, (1991) e foi combinado com o modelo de estabilidade o que possibilitou a simulação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente na Quinta das Carvalhas.

De acordo com os resultados obtidos e após análise, verificam-se discepâncias nos diversos cenários, à medida que se alterna a resolução espacial dos modelos.

## **ABSTRACT**

**Keywords:** DEM; landslide; susceptibility; SHALSTAB, RDD.

A small fraction of this study is dedicated to the Quinta do Bomfim and analysis of various types of MDE's created a base from elevation points and contours and others manipulated from the MDE (0.20m to 0.4m, 1m, 2m and 5m respectively) which were termed "generalized".

This dissertation aims to study the slope instability processes in the Douro Demarcated Region (RDD), namely Quinta das Carvalhas. It aims at the application of the mathematical model of physical base SHALSTAB, using various hydrological component and physical component modeling, to generate several scenarios of instability simulation.

The modeling was performed based on the construction of 5 Digital Elevation Models (MDE) derived from aerial photographs of Spin.Works. More 2 MDEs from Municipia were also used. Spin.works captured aerial photographs at an altitude of 100m, making MDE's with 20cm of equidistance. The company Municipia elaborated flights to 5000m of altitude with the intention of producing MDE's with 50cm equidistance.

The models with different spatial resolutions (0.20m, 0.40m, 1m, 2m, 5m) were the results of comparison target, to demonstrate that best fit the definition of instability processes agricultural levels slope . The Quinta das Carvalhas slides inventory was obtained through the work already developed by the CloudMapper project team, and the results validation has the inventory as a base. The data of the physical parameters for SHALSTAB modeling were applied in the present study after laboratory investigation. At the same time, field experiments were carried out for Quinta das Carvalhas: to electrical resistivity, hydraulic conductivity, soil texture and infiltration capacity.

The analysis of different resolutions allows a better analysis, since several scenarios are developed that allow an individual and joint evaluation.

The algorithm used in hydrological modeling was Multiple Flow Direction (MFD) by Quinn et al. (1991) and was combined with the stability model, which enabled the simulation of the susceptibility to the occurrence of slope movements in Quinta das Carvalhas.

According to the results obtained and after analysis, there are discrepancies in the different scenarios, as the spatial resolution of the models is altered.

## Índice de Figuras

Figura 1 - Sub-regiões da Região Demarcada do Douro. Fonte: Portugal Patrimónios. Sommeliers.....	4
Figura 2 - Terraços agrícolas no Vale do Douro. (Bateira, 2015).....	6
Figura 3 - Enquadramento das áreas de estudo no Alto Douro Vinhateiro.....	7
Figura 4 - Mapa geológico de Portugal. Extraído de Faria, (2014).....	9
Figura 5 - Evolução histórica dos sistemas de deteção remota (adaptado Chuvieco, 1995).....	11
Figura 6 - Principais operabilidades de dois tipos de drones.....	12
Figura 7 - Exemplos de drones. ....	14
Figura 8 - Esquema de operabilidade do equipamento Drone. Margarete Maria .....	15
Figura 9 - A técnica SfM (adaptado de Westboy, et al., 2012).....	17
Figura 10 - Comparativos entre a estação LiDAR e técnica SfM. (adaptado de Johnson, et al., 2014, p. 2.) .....	18
Figura 11 - Etapas do processo SfM (adaptado de Verhoeven, et al. 2013) .....	19
Figura 12 - Deteção e correspondência de pontos de interesse em comum. extraído de Verhoeven, et al., (2013).....	20
Figura 13 - Esquematização do ajuste de imagens em conjunto (Bundle adjustment) (retirado de Felizardo, 2016).....	21
Figura 14 - Diferenças entre MDE e MDT. Extraído do Laboratório de Geomática.....	22
Figura 15 - Etapas de construção de um MDE. Extraído de Felizardo, (2016). ....	23
Figura 16 - Esquema conceptual do conceito “risco”. (adaptado de Zêzere, 2005).....	26
Figura 17 - Escala de velocidade para os movimentos de vertente. Adaptado (Cruden e Varnes, 1996). ....	28
Figura 18 - Esquema conceptual à ocorrência de movimentos de vertente. Adaptado (Zêzere, 2005). ....	34
Figura 19 - Esquema relativo às tensões que atuam numa superfície de rotura potencial. Adaptado de Selby, (1993) in Vieira (2007). ....	36
Figura 20 - Esquema de determinação da espessura do solo (z). Adaptado de Selby,, (1993), in Vieira (2007).....	38
Figura 21 - Representação visual do processo do algoritmo Determinístico 8.....	40
Figura 22 - Representação visual do algoritmo Dinfinito. Adaptado de Tarboton (1997).....	41
Figura 23 - Exemplo ilustrativo da construção de facetas triangulares a volta de uma célula. (Seibert e McGlynn, 2007). ....	42

Figura 24 – Padrão de distribuição espacial dos fluxos dos diferentes algoritmos (a) D8; (b) MD8; (c) $D^\infty$ ; (d) $MD^\infty$ . Adaptado de Seibert e McGlynn (2007) .....	42
Figura 25 - Métodos de análise de suscetibilidade a movimentos de vertente. Adaptado Faria, (2014). .....	43
Figura 26 - Elementos topográficos do modelo hidrológico incorporado no SHALSTAB. Extraído de Montgomery & Dietrich (1994). .....	46
Figura 27 - Ilustração do gráfico representativo das classes de estabilidade atribuídas pelo SHALSTAB. Montgomery & Dietrich, 1994 in Vieira (2007). .....	50
Figura 28 - Sobreposição dos declives com as classes atribuídas. ....	58
Figura 29 - Declives MDE 0,20m; MDE 0,40m e MDE 1m da Quinta das Carvalhas .....	62
Figura 30 – Declives MDE de 2m e MDE de 5m. ....	63
Figura 31 - Declives MDE de 1m e MDE de 5m provenientes da Municipia. ....	64
Figura 32 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; $D^\infty$ ;MFD). MDE de 1m de resolução. ....	65
Figura 33 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; $D^\infty$ ;MFD). MDE de 0,20m de resolução. ....	68
Figura 34 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; $D^\infty$ ;MFD). MDE de 0,40m de resolução. ....	68
Figura 35 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; $D^\infty$ ;MFD). MDE de 2m de resolução. ....	69
Figura 36 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; $D^\infty$ ;MFD). MDE de 1m de resolução. ....	72
Figura 37 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; $D^\infty$ ;MFD). MDE de 1m de resolução. Municipia. ....	73
Figura 38 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; $D^\infty$ ;MFD). MDE de 5m de resolução. ....	74
Figura 39 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; $D^\infty$ ;MFD). MDE de 5m de resolução. Municipia. ....	74
Figura 40 - Mancha visual comparativa dos diferentes algoritmos Comparação entre algoritmos (D8, $D^\infty$ , MFD, por ordem) elaborada através do software, SAGA GIS. ....	75
Figura 41 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; $D^\infty$ ;MFD). MDE de 0,40m de resolução. Zoom aplicado. ....	76
Figura 42 - Permeâmetro de Guelph (adaptado de Faria, 2014). ....	78

Figura 43 - Exemplo de cicatriz de um deslizamento na Quinta das Carvalhas. Extraído de Faria (2014) .....	80
Figura 44 - Modelação de Suscetibilidade “A”. Quinta das Carvalhas. (MDE 0,20m de resolução. Spin.works), modelação SHALSTAB.....	83
Figura 45 - Modelação de Suscetibilidade “B”. Quinta das Carvalhas. (MDE 0,40m de resolução. Spin.works), modelação SHALSTAB.....	84
Figura 46 - Modelação de Suscetibilidade “C”. Quinta das Carvalhas. (MDE 1m de resolução. Spin.works), modelação SHALSTAB.....	86
Figura 47 - Modelação de Suscetibilidade “D”. Quinta das Carvalhas (MDE 2m de resolução. Spin.works), modelação SHALSTAB.....	87
Figura 48 - Modelação de Suscetibilidade “E”. Quinta das Carvalhas (MDE 5m de resolução. Spin.works), modelação SHALSTAB.....	88
Figura 49 - Modelação de Suscetibilidade “F”. Quinta das Carvalhas (MDE 1m de resolução. Municipia), modelação SHALSTAB. ....	89
Figura 50 - Modelação de Suscetibilidade “G”. Quinta das Carvalhas (MDE 5m de resolução. Municipia), modelação SHALSTAB. ....	90

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Marcos históricos na detecção remota (Campbell. and Wynne, 2011, p. 7).....	12
Tabela 2 - Classificações de movimentos de vertentes mais divulgadas e adotadas Extraído de Zêzere (2005).....	27
Tabela 3 - Abrangência dos movimentos de vertente, proposto por Zêzere (2005). ....	29
Tabela 4 - Classificação dos movimentos de vertente (adaptado de Varnes, 1978 e Dikau et al., 1996). ....	29
Tabela 5 - Classificação dos deslizamentos (adaptada da Dikau et al., 1996) .....	31
Tabela 6 - Tipos de movimentos de vertente. ....	33
Tabela 7 - Classes de estabilidade e respetiva saturação, obtidas através da combinação dos modelos (adaptado de Dietrich & Montgomery (1998) in Vieira (2012)).....	50
Tabela 8 - Tabela de contigência. (adaptado de Kohavi & Provost, 1998). ....	51
Tabela 9 - Método de elaboração das tabelas de contigência/matriz de confusão. Matriz das tabelas e seus acrónimos. (adaptado de Kohavi & Provost, 1998).....	51
Tabela 10 - Fluxo de trabalho.....	54
Tabela 11 - Modelos Digitais de Elevação da Quinta do Bomfim elaborados a partir do MDE 0,20m. ....	56
Tabela 12 - Reclassificação dos declives do MDE de 1m de resolução, com base nas classes atribuídas. ....	58
Tabela 13 - Declives dos voos operados pela Spin.works. ....	59
Tabela 14 - Declives dos voos operados pela Municipia.....	60
Tabela 15 - Dados quantitativos dos algoritmos de modelação hidrológica da Quinta das Carvalhas. Spin.works.....	66
Tabela 16 - Dados quantitativos dos algoritmos de modelação hidrológica da Quinta das Carvalhas. Municipia .....	67
Tabela 17 - Valores de referência de K. (Adaptado de Freeze e Cherry, 1979, in GOMES (2012, p. 24)). ....	79
Tabela 18 - Valores utilizados nos parâmetros de modelação SHALTSTAB (SAGA GIS). ....	81
Tabela 19 - Tabela de validação de suscetibilidade de ocorrência a movimentos de vertente na Quinta das Carvalhas.....	95

## **ACRÓNIMOS E SÍMBOLOS**

**2D** - Bidimensional

**3D** - Tridimensional

**a** - Área de contribuição

**ACC** - Acurácia ou fiabilidade

**ADV** - Alto Douro Vinhateiro

**ASIFT** - Affine-SIFT

**c/c'** - Coesão do solo/coesão efetiva

**D $\infty$**  - Algoritmo D-Infinity

**D8** - Algoritmo Deterministic 8

**dLSAM** - Slope Instability Model

**ETRS** - European Terrestrial Reference System

**EXIF** - Exchangeable image file format

**e/z** – Espessura do solo/espessura do solo instável

**F1** - Rácio da precisão de Verdadeiros Positivos

**FN** - Falsos negativos

**FP** - Falsos positivos

**FS** - Fator de Segurança

**g** - Força gravitacional

**h** - altura da coluna de água acima do plano de rutura

**i** - Gradiente hidráulico

**KPa** - Quilopascal

**Ksat** – Condutividade hidráulica saturada

**LiDAR** - Light Detection And Ranging

**LISA** - Level I Stability Analysis

**MD8** - Algoritmo Multiple Flow Direction

**MDE** - Modelo Digital de Elevação

**MDS** - Modelo Digital de Superfície

**MDT** - Modelo Digital de Terreno

**MP** - Megapixel

**MPa** - Megapascal

**MVS** - Multi-view Stereo

**ps** - Peso específico do solo

**pw** - Densidade da água ou peso específico da água



**PPV** - Precisão ou potencial de deslizamento  
**Q/Qc** - Precipitação/ precipitação critica  
**RDD** - Região Demarcada do Douro  
**RFP** - Rácio de Falsos Positivos  
**ROA** - Remotely Operated Aircraft  
**RPV** - Remotely Piloted Vehicle  
**RVP** - Rácio de Verdadeiros Positivos  
**S** - Área de secção transversal saturada  
**S/t** - Resistência ao cisalhamento  
**sen** - Seno  
**SfM** - Structure-from-motion  
**SHALSTAB** - Shallow Landslide Stability Model  
**SIFT** - Scale Invariant Feature  
**SIG** - Sistemas de Informação Geográfica  
**SINMAP** - Stability Index MAPping  
 $\tau$  - Tensão ao cisalhamento  
**T** - Forças motoras  
**TRIGRS** - Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope Stability  
**UAV** - Unmanned Aerial Vehicle  
**UNESCO** - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura  
**UVS** - Unmanned Vehicle Systems  
**v** - Velocidade  
**VANT** - Veículo Aéreo Não Tripulado  
**VN** - Verdadeiros negativos  
**VP** - Verdadeiros positivos  
**Ysub** - Peso volumétrico do solo submerso  
**Ysat** - Peso volumétrico do solo saturado  
**z** - Espessura do solo  
**y** - Peso volumétrico natural do solo  
**y sat** - Peso volumétrico do solo saturado  
 $\mu$  - Pressão intersticial  
 **$\Phi/\Phi'$**  - Ângulo de atrito interno/ângulo de atrito interno efetivo  
 **$\sigma/\sigma'$**  - Tensão normal total /tensão normal efetiva

$\beta$  – Declive

$\theta$  - seno do angulo da vertente

## INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Nos últimos anos, têm surgido cada vez mais estudos e projetos relacionados com os movimentos de vertente e sua instabilidade em Portugal. (Bateira, 2001, 2015; Faria, 2014; Garcia, 2012; Marques, 2013; Pereira, 2014; Pimenta, 2011; Rodrigues, 2005; Soares, 2008; Zêzere, 1997, 2005).

A Região Demarcada do Douro (RDD) apresenta características climáticas, orográficas e mesológicas que possibilitam o aproveitamento económico dos recursos naturais existentes e das atividades lá desenvolvidas. Estes fatores são aliados a uma topografia acidentada, onde a intervenção antrópica é elevada e reflete-se em impactos profundos na transformação do território. Esta intervenção verifica-se através da construção de patamares agrícolas com taludes de declive acentuado (necessidade de intervenção e construção, de modo a obter maior rentabilidade económica de áreas para a produção agrícola vinhateira), são alvo de processos de instabilidade geomorfológica. Estes processos de instabilidade geram deslizamentos, causando destruição e, consequentemente graves prejuízos económicos para os produtores vitícolas.

Atendendo a estas situações, surge o projeto CloudMapper: *Plataforma de processamento e disseminação de dados georreferenciados com base na Cloud*. É um projeto desenvolvido a partir de um protocolo entre a ADVID (Associação para o Desenvolvimento da Viticultura Duriense), o Departamento de Geografia da Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Instituto Superior de Agronomia e a Spin.Works S.A., tendo como empresas parceiras a Real Companhia Velha (Quinta das Carvalhas) e Symington Vinhos S.A. (Quinta do Bomfim). Neste projeto a empresa Spin.Works surge como promotor e é a responsável pela obtenção das fotografias aéreas que posteriormente servirão para a construção dos Modelos Digitais de Elevação. De um outro projeto, surge a empresa Municipia, também responsável pela obtenção de fotografias aéreas, através do uso de *drones*. Através destas duas fontes, foram obtidas fotografias aéreas, a partir das quais foi possível dar início ao pressuposto trabalho.

Foram definidas duas bacias hidrográficas de áreas experimentais distintas, de duas quintas localizadas na RDD. São elas a Quinta do Bomfim e a Quinta das Carvalhas.

O presente trabalho visa a modelação de instabilidade e processos de escoamento subsuperficial de taludes em patamares agrícolas, com o objetivo de determinar o que melhor se ajusta à determinação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente na Quinta das Carvalhas.

O objetivo primário passa pela elaboração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) de diversas resoluções espaciais e obtidos de voos com altitudes diferentes, por parte de duas companhias distintas, a partir dos quais, se construirá cartografia de risco que será analisada através de métodos de cartografia indireta. Através destes modelos, visa-se uma comparação, utilizando a aplicação do modelo matemático de base física – SHALSTAB, com finalidade de considerar vários cenários de suscetibilidade, procedendo à metodologia de validação adotada. Este trabalho poderá servir de suporte para a mitigação dos impactos, já referidos, por parte dos proprietários das áreas de cultivo e produção de vinha. Os principais objetivos deste trabalho compreendem:

- Recolha e tratamento dos dados de base para investigação; Levantamento no terreno de parâmetros físicos e hidrológicos, de modo a relacioná-los com a hidrologia e instabilidade de vertentes;
- Construção de Modelos Digitais de Elevação, de diferentes resoluções espaciais (0,20m; 0,40m; 1m; 2m e 5m) para estudo comparativo;
- Comparação de diferentes algoritmos de modelação hidrológica;
- Exibição e análise dos parâmetros de suscetibilidade obtidos, realizando simulação da suscetibilidade, aplicando o método do modelo matemático de base física (SHALSTAB), com recurso aos MDE construídos;
- Concretização de vários cenários de suscetibilidade para cada resolução espacial distinta, com base nos voos realizados por empresas distintas;
- Análise individual e comparativas dos diferentes cenários;
- Validação das modelações do SHALSTAB, utilizando tabelas de contingência.

Atendendo à estrutura do trabalho, a seguinte dissertação é constituída por cinco capítulos.

O primeiro capítulo apresenta o enquadramento geográfico das áreas de estudo em questão.

O segundo capítulo aborda o enquadramento conceptual necessário para a compreensão da temática do trabalho. Numa primeira fase são abordados os conceitos de Detecção Remota, *Drone*, *SfM (Structure from Motion)*, MDE (Modelos Digitais de Elevação). Numa segunda fase é abordada a temática do conceito “risco” e movimentos de vertente, nomeadamente quanto à sua classificação, tipologia, fatores desencadeantes, estabilidade e rutura de vertentes. Numa terceira fase são apresentados os algoritmos de modelação hidrológica (D8, D $\infty$ , MFD). Por fim surge uma descrição sobre o modelo matemático de base

física (SHALSTAB), metodologias de validação de cenários de suscetibilidade, explicando o funcionamento do modelo de estabilidade e modelo hidrológico, terminando com a combinação de ambos.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia para a aquisição das fotografias aéreas e obtenção de dados, bem como o fluxograma deste trabalho. Aborda ainda Modelos Digitais de Elevação para a Quinta do Bomfim; processamento dos MDE's a Quinta das Carvalhas e parâmetros de suscetibilidade utilizados na modelação.

O quarto e último capítulo visa a análise e discussão dos resultados obtidos através dos métodos utilizados. São apresentadas 7 modelações distintas, provenientes dos MDEs elaborados que socorreram-se de validação, através de tabelas de contingência. Por fim, é realizada uma análise comparativa às modelações, de modo a compreender quais as que possuem maior capacidade preditiva.

# CAPÍTULO 1 – ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

## 1. Região Demarcada do Douro

A Região Demarcada do Douro é considerada desde 1756, a primeira região com regulamentação e delimitação de vinhos do mundo.

No seu contexto, o Alto Douro Vinhateiro (ADV) foi inscrito na Lista do Património Mundial da UNESCO na categoria de Paisagem Cultural Evolutiva e Viva (a 14 de Dezembro de 2001, na 25.ª sessão do Comité do Património Mundial, realizada em Helsínquia (CCDRN, 2012). Tem uma superfície de 24.600ha, ou seja, é cerca de um décimo do total da RDD (área de 225 400ha), estendendo-se ao longo das encostas do rio Douro, abrangendo 13 municípios.

A RDD divide-se em três sub-regiões distintas com características próprias, sendo elas: Baixo Corgo, Cima Corgo e Douro Superior (Figura 1).

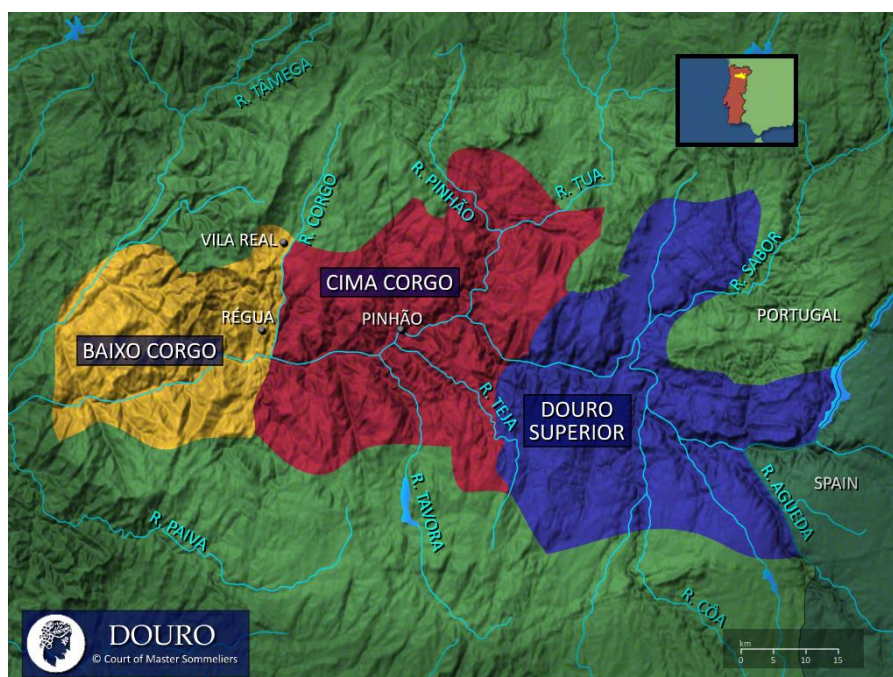


Figura 1 - Sub-regiões da Região Demarcada do Douro. Fonte: Portugal Patrimónios. Sommeliers

Esta área revela-se como uma paisagem cultural evolutiva e viva, centrada na vitivinicultura com terreno muito declivoso onde predominam formações xistentas. Nomeadamente em relação ao solo fértil, este é escasso assim como a água, porventura o número de horas de sol é abundante. A paisagem traduz uma relação singular do homem com a natureza que, através do aperfeiçoamento das técnicas de valorização do solo.

Segundo a CCDRN (2012), o ADV “ (...) é uma obra multissecular, instalada num corredor de passagem de povos e culturas, de adaptação de técnicas e saberes específicos de cultivo da vinha para a produção de vinhos mundialmente reconhecidos, correspondentes às denominações de origem “Porto” e “Douro”, mas também de outras culturas mediterrânicas, como a oliveira e a amendoeira. A qualidade e o valor excecional do vinho justificam o esforço coletivo sobre-humano de sucessivas gerações traduzido numa paisagem de imagem singular universal considerada uma obra-prima coletiva.”

## 2. A instabilidade de vertentes na RDD

Os movimentos de vertente são eleitos como um dos grandes problemas naturais em diversas regiões do planeta, sendo responsáveis por enormes fatalidades e mais especificamente perdas económicas e social. (Popescu, 2002; Carrara *et al.*, 2003; Huabin *et al.*, 2005; Rotaru *et al.*, 2007).

O cultivo da vinha na região do Douro, já ocorre há muitos séculos (antecedendo o século XVIII), mas assumiu maior destaque após sua delimitação e regulamentação. Um século depois em 1860, a vinha foi afetada com uma praga (filoxera), tendo provocado a destruição de uma grande parte da viticultura. Para limitar estes efeitos negativos na produção, fizeram-se estudos para combater estas pragas, chegando-se à conclusão que o problema se resolvia optando, entre outras ações, pela alteração da forma de armação do terreno. Segundo Bateira (2015), generalizou-se a vinha tradicional (ou vinha *a eito*) e nas áreas com declives mais fracos elaborava-se vinha ao alto (permitia um melhor arejamento da vinha, tornando mais fácil o combate às pragas). O contínuo processo de mecanização das explorações agrícolas levaram à substituição dos socalcos com muros de suporte pelos terraços agrícolas com taludes de terra. (Bateira, 2015)

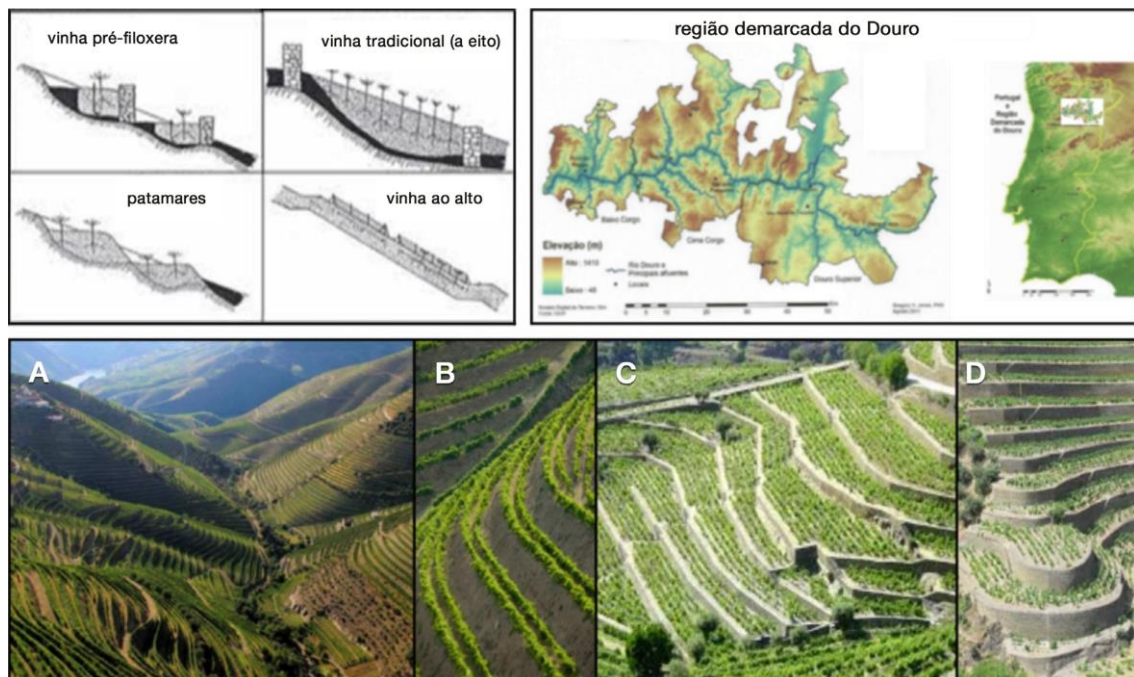


Figura 2 - Terraços agrícolas no Vale do Douro. A e B – taludes em terra; C e D – muros de suporte (Bateira, 2015).

Estas modificações no terreno alteram a paisagem, bem como as características geomorfológicas dos terrenos. A ação antrópica na organização das vertentes pode contribuir para o agravamento da erosão e potenciar o desenvolvimento de movimentos de vertente (Figura 2).

A construção destas plataformas modificam a estrutura do terreno e a coesão dos solos, o que implicará uma grande mudança nos parâmetros físicos responsáveis pela estabilidade dos taludes. Segundo Bateira (2006) os movimentos de vertente observados na região do Douro parecem estar diretamente relacionado com novos métodos de cultivo (ex: vinhas em patamares construídas sem muros de suporte) ou, por outro lado, com a dificuldade em manter as estruturas tradicionais de drenagem das vertentes.

Relativamente às técnicas de armação do terreno, surgem outros problemas a estes associados, nomeadamente nos processos de circulação hídrica, que desempenham um papel fulcral na dinâmica das vertentes do Douro. A movimentação de grandes quantidades de solo, sem a inexistência de coberto vegetal nas paredes dos taludes e nas vinhas ao “alto”, permite o desenvolvimento da concentração do escoamento superficial. Bateira (2015) diz: “A disposição horizontal da plataforma construída promove a infiltração contribuindo para um acréscimo de água ao fluxo interno a uma profundidade imediatamente abaixo das superfícies de plantio da vinha”.



A RDD surge como uma das regiões mais propícias à ocorrência de movimentos de vertente em Portugal Continental. (Bateira & Soares, 1997).

### 3. Áreas de estudo

Para a elaboração deste trabalho foram definidas duas bacias hidrográficas de áreas experimentais distintas, ambas localizadas na RDD. São elas a Quinta do Bomfim e a Quinta das Carvalhas (Figura 3).

A Quinta do Bomfim situa-se na margem direita do Rio Douro, numa área onde se localizam várias quintas produtoras de vinho. Pertencente à *Symington Family Estates*, abrange uma área de 98 hectares, cerca de 79% dedicados à plantação vinícola. A quinta está situada no Pinhão, município de Alijó, de Vila Real.

A Quinta das Carvalhas situa-se na margem esquerda do Rio Douro em frente à vila do Pinhão, na freguesia de Ervedosa do Douro (município de São João da Pesqueira) e está estrategicamente localizada no centro geográfico da sub-região Cima Corgo. Pertence à *Real Companhia Velha*, tem uma área de 120 hectares, dos quais 78ha dedicados exclusivamente ao cultivo de vinha.

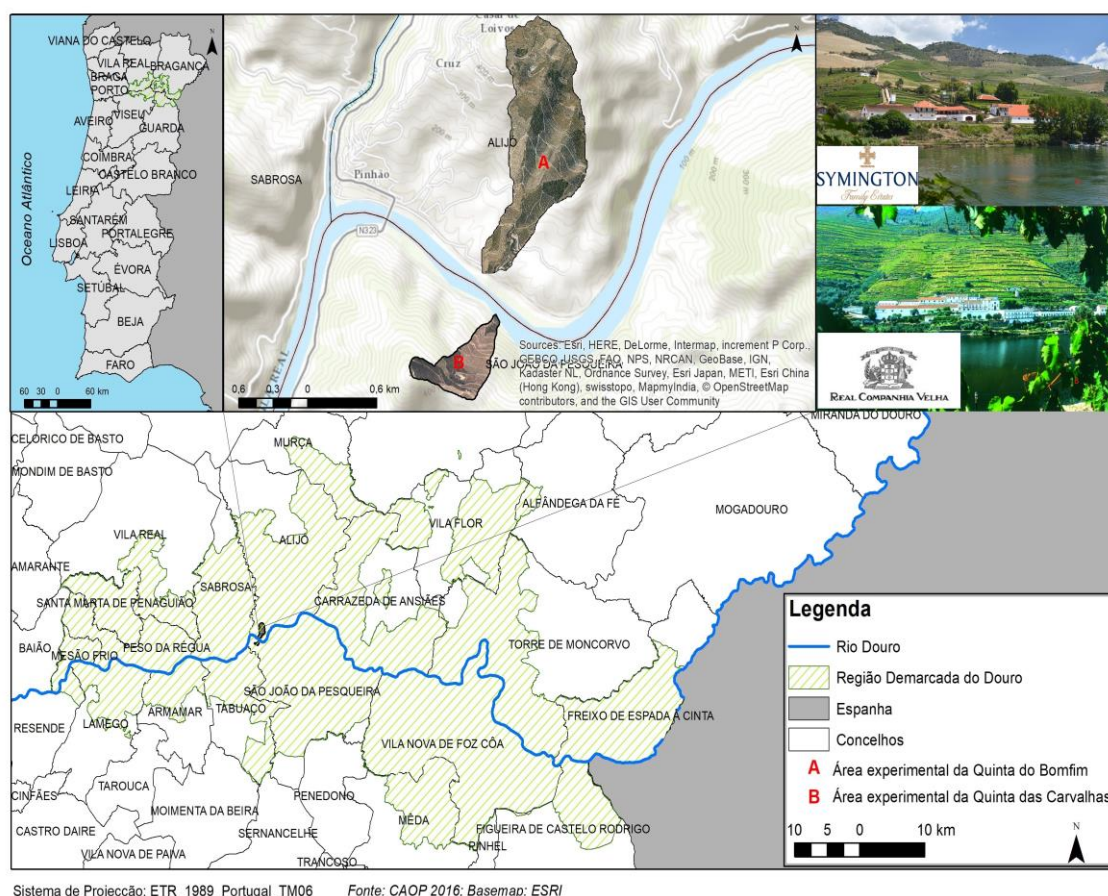


Figura 3 - Enquadramento das áreas de estudo no Alto Douro Vinhateiro.

#### 4. Litologia

Segundo Sousa (1982), o Vale do Douro é principalmente constituído pelo Complexo Xisto-Grauváquico, caracterizado pela predominância de xistos intercalados por filitos e metagrauvaques (Figura 4).

Devido à diversidade no que toca à organização das estruturas litológicas, é possível identificar as seguintes formações na Região Demarcada do Douro, concretamente nas áreas de estudo: formação de Bateiras, formação de Desejosa, e por último, a formação do rio Pinhão, a formação do Pinhão e formação Ervedosa do Douro. *“A meteorização desse conjunto de formações geológicas origina o desenvolvimento de formações superficiais que são a base dos solos de textura fina”* (Bateira, C., 2015). O autor ainda acrescenta que a maioria dos patamares agrícolas construídos para a plantação de vinha são feitos com base nestas formações, cuja textura apresenta a predominância de argila e silte.

A área experimental (Quinta das Carvalhas) é constituída pela formação de Bateiras. Apresenta-se como uma formação autóctone, sendo a unidade estratigráfica mais antiga do grupo do Douro. Esta formação *“manifesta-se no núcleo de três estruturas anticlinais da primeira fase hercínica, nomeadamente no Anticlinal de Abaças-Bateiras, no de Adorigo e no de Santo Adrião-Santa Leocádia”* (Bateira, 2015). Segundo Silva (2005) a formação de Bateiras divide-se em dois grupos distintos. O membro inferior mostra alternância entre filitos e metagrauvaques cinzentos com frequentes níveis de filitos grafitosos. Por sua vez, o Membro superior apresenta na sua constituição filitos e metagrauvaques intercalando níveis de calcários, calcoxistos e calcossilicatadas. É possível verificar também a existência de metaconglomerados e metamicroconglomerados, de matriz calcossilicatada, bem como *skarns* e corneamas na proximidade dos maciços granitoides variscos. (Silva, 2005)

Na outra área experimental (Quinta do Bomfim) Aflora ainda formação autóctone, a formação de Ervedosa do Douro, com a presença de termos pelíticos que são essencialmente filitos e quartzo-filitos de cor verde e cloríticos duros (Bateira, 2015). A formação de rio Pinhão também aflora nesta área de estudo, sendo alóctone, é a unidade equivalente lateral da Formação de Bateiras (Silva & Ribeiro, 1985). Suas litologias são semelhantes à Formação de Bateiras, sendo *“distribuídas por metagrauvaques, filitos cloríticos e filitos grafitosos no tramo inferior e metaconglomerados de matriz calcossilicática ou calcária, filitos, metagrauvaques, calcários, calcoxistos e calcossilicatadas ou corneanas no Membro superior.”* (Silva, 2005). Aflora ainda a formação de Pinhão, sendo a unidade equivalente lateral da Formação de

Ervedosa do Douro (Silva & Ribeiro, 1985). Silva, (2005) “Esta sequência caracteriza-se por uma ritmicidade, tal como na Formação de Ervedosa do Douro, constituída pela alternância de leitos pelíticos (filitos e quartzo-filitos cloríticos esverdeados) e psamíticos (metagrauvaques e metaquartzovaques). Níveis de filitos cloríticos mais esverdeados com magnetite e pirite ocorrem com frequência.”

A tectónica ‘presente’ na Quinta das Carvalhas remete para a fracturação varisca de orientação essencialmente WNW-ESE. Esta fracturação apresenta-se importante na área da quinta, pois marca a transição da Formação de Bateiras para a Formação de Ervedosa do Douro. Faria, (2014).

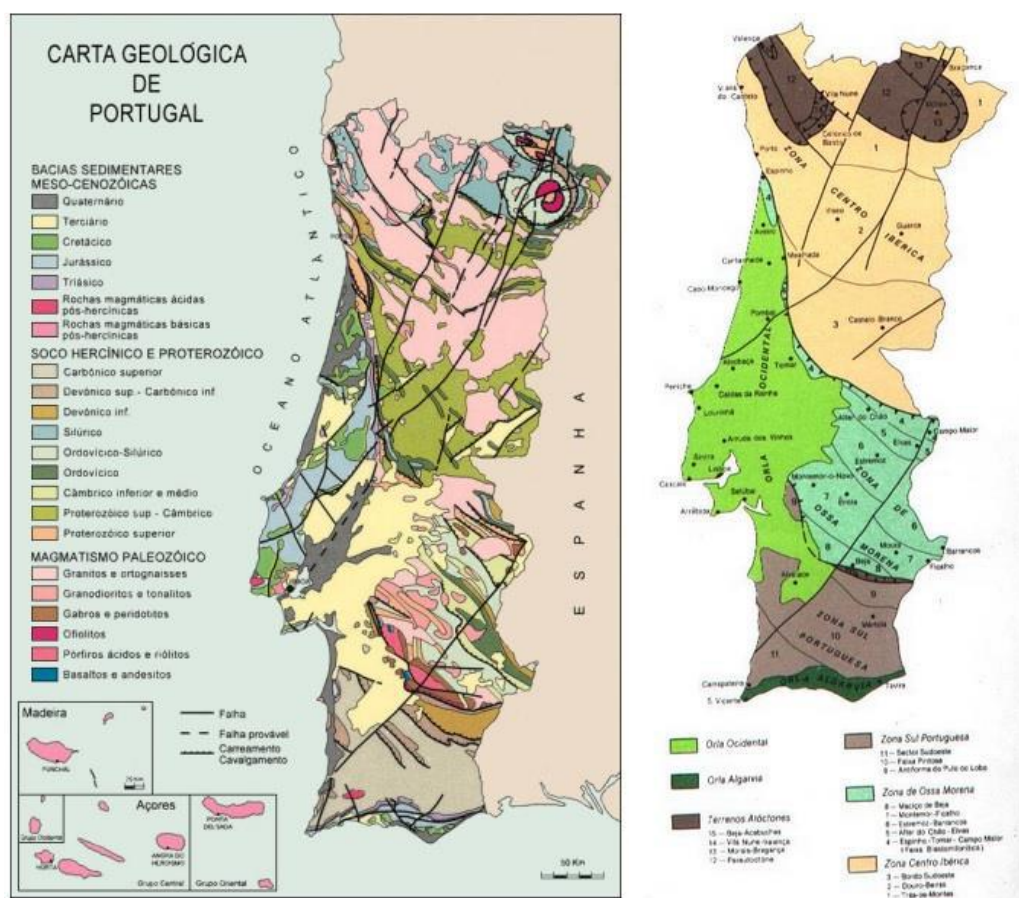


Figura 4 - Mapa geológico de Portugal, escala 1/500000 - Retirado do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e inovação, I.P B-Zonas estruturais de Portugal Continental. Retirado de Araújo (s/d). Extraído de Faria, (2014).

## CAPÍTULO 2 – ENQUADRAMENTO CONCEPTUAL

### 1. Detecção Remota

O termo “detecção remota” surgiu no meio científico em meados da década 1960 e numa definição simplista referia-se à aquisição de informações sem contacto físico com os objetos (Novo & Ponzoni, 2001). Por outras palavras, Casaca *et al.* (2000) referem-se à “detecção remota” como métodos para a recolha de informação geográfica, ou seja, aquisição de informação sobre fenómenos distribuídos espacialmente pela Terra. Esta recolha pode ser feita por interpretação de imagens (numéricas e fotográficas) e por medição, sendo obtidas através de energia eletromagnética emitida e refletida.

O conhecimento da detecção remota converge de duas linhas de pesquisa diferentes, sendo elas a aerofotogrametria e fotointerpretação e, de outro lado, da pesquisa espacial e dos progressos tecnológicos. A fotogrametria<sup>1</sup> é considerada como uma técnica da detecção remota, sendo considerada das mais comuns, devido à sua versatilidade e economia (Paine, *et al.*, 2012).

As primeiras fotografias aéreas com o intuito de produção cartográfica foram tiradas por Gaspar Félix de Tournachon, em 1859, a partir de um balão de ar quente a 80m do solo (Chuvieco, 1995). Nos anos seguintes verificou-se um desenvolvimento da fotografia tirada a partir de aviões devido a grandes progressos em óticas fotográficas. Em 1909, Wilbur Wright efetua a sua primeira fotografia aérea, abrindo caminho à observação terrestre a partir de plataformas remotas (Martins, 2012) (Figura 5).

---

<sup>1</sup> Fotogrametria: “é formada a partir da junção de três palavras de origem grega (*photon-luz; graphos-descrição; metron-medida*), ou seja, pode ser definida como a ciência ou arte de se obter medidas dignas de confiança através de fotografias aéreas” (Tommaselli, 2009). Este método subdivide-se em fotogrametria analógica, analítica e digital.

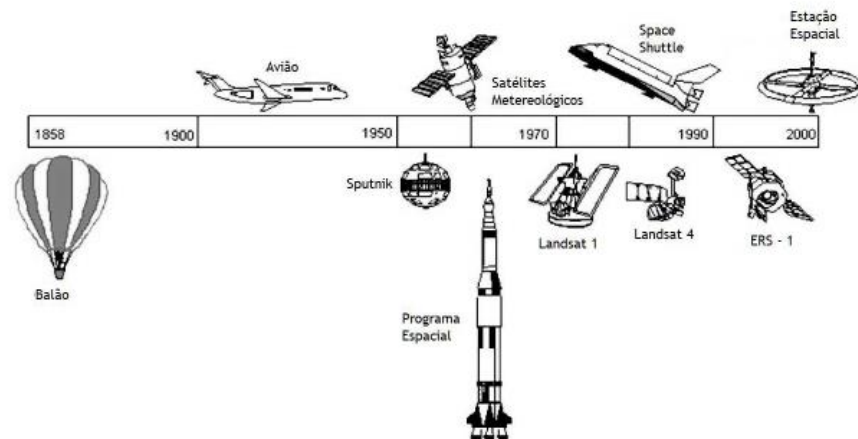


Figura 5 - Evolução histórica dos sistemas de detecção remota (adaptado Chuvieco, 1995).

O período entre as duas guerras mundiais estimulou o desenvolvimento da fotografia aérea, de tal modo que se atingiu uma produção em massa, a um nível industrial. O progresso nos meios de cálculo desenvolvidos no período da 2ª Guerra favoreceram esta área científica, o que levou a criação de métodos e novas técnicas analíticas em fotogrametria. Nos anos seguintes surgiu o primeiro instrumento para produção de ortofotomapas e com a invenção do computador, houve um salto para a generalização em fotogrametria analítica<sup>2</sup> (Casaca, *et al.*, 2000).

O avanço da tecnologia permitiu a utilização de câmaras métricas digitais. O avanço nas técnicas e instrumentos nesta área têm continuado a um ritmo acelerado e cada vez mais preciso, eficiente no que toca à produção cartográfica (Wolf, *et al.*, (2013). A cartografia digital foi surgindo em paralelo com a computadorização e desenvolvimento da informática, nomeadamente no *software* e *hardware*. Após numéricos progressos neste ramo, em 1988 aparecem as primeiras estações de trabalho fotogramétricas digitais, apresentadas no Congresso de Kyoto (Konecny, 2014) (Tabela 1).

<sup>2</sup> Compreende-se por fotogrametria analítica a disciplina que nos permite, a partir de medidas feitas em fotografias de um objeto e através da aplicação de modelos matemáticos, obter coordenadas ou outras informações métricas do objeto em questão.



Milestones in the History of Remote Sensing	
1800	Discovery of infrared by Sir William Herschel
1839	Beginning of practice of photography
1847	Infrared spectrum shown by A. H. L. Fizeau and J. B. L. Foucault to share properties with visible light
1850–1860	Photography from balloons
1873	Theory of electromagnetic energy developed by James Clerk Maxwell
1909	Photography from airplanes
1914–1918	World War I: aerial reconnaissance
1920–1930	Development and initial applications of aerial photography and photogrammetry
1929–1939	Economic depression generates environmental crises that lead to governmental applications of aerial photography
1930–1940	Development of radars in Germany, United States, and United Kingdom
1939–1945	World War II: applications of nonvisible portions of electromagnetic spectrum; training of persons in acquisition and interpretation of airphotos
1950–1960	Military research and development
1956	Colwell's research on plant disease detection with infrared photography
1960–1970	First use of term <i>remote sensing</i> TIROS weather satellite Skylab remote sensing observations from space
1972	Launch of Landsat 1
1970–1980	Rapid advances in digital image processing
1980–1990	Landsat 4: new generation of Landsat sensors
1986	SPOT French Earth observation satellite
1980s	Development of hyperspectral sensors
1990s	Global remote sensing systems, lidars

Tabela 1 - Marcos históricos na detecção remota (Campbell. and Wynne, 2011, p. 7).

## 1.1. Drones

Os *Drones* são pequenos veículos aéreos não tripulados, sem qualquer contacto físico direto. Estes veículos podem ser controlados de maneira automática, semiautomática ou manual. Estas aeronaves caracterizam-se por dois aspetos básicos: (i) não possuem piloto a bordo; (ii) carregam equipamentos para executar suas tarefas. Para além destes termos, existem outros ou o termo mais difundido, *Drone* (Figura 6).

### Principais equipamentos de um drone

Vants menores como o de asas rotatórias podem ser controlados a distância com um *notebook* e um *joystick*

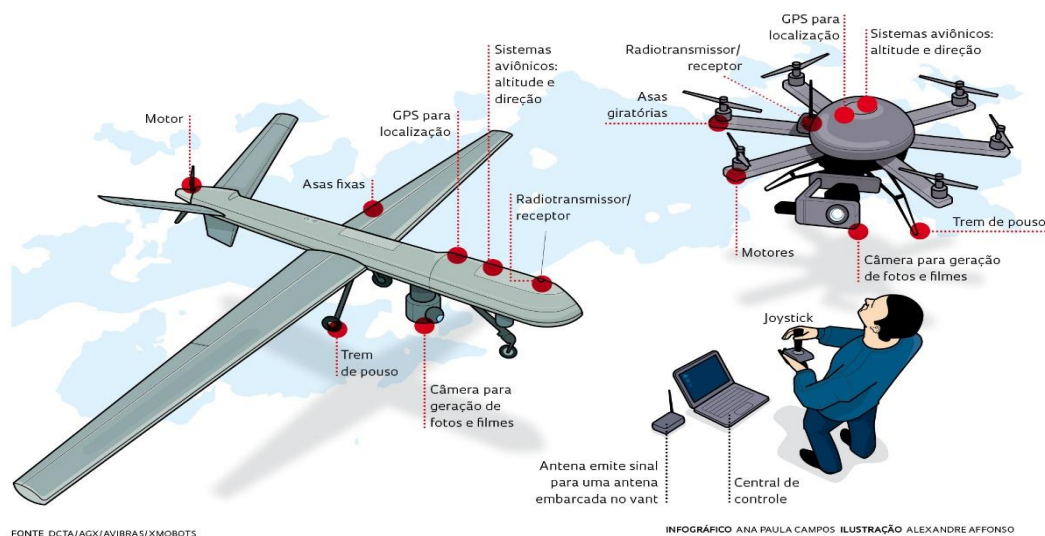


Figura 6 - Principais operabilidades de dois tipos de drones: asa fixa, hélices.

Existem diversas empresas que produzem cartografia digital, nomeadamente em Portugal, através da utilização de VANTS. Para a realização deste projeto utilizou-se cartografia produzida pelas empresas Spin.Works e Municipia.

Este projeto CloudMapper aproveitou certos desenvolvimentos anteriormente realizados pela Spin.works: O sistema Micro UAV S20 que pode sobrevoar centenas de hectares por dia; o *software* de processamento de imagem que permite processar os dados capturados (fotografias em várias gamas de comprimento de onda) em dados com interesse alargado a vários sectores económicos (ortofotomapas, mapas digitais de terreno, cartografia de alta resolução, mapas de índice NDVI, etc.) (ClouddMapper, 2017). A Spin.works atendendo a estes ativos, desenvolveu um processo em larga escala de produtos específicos para a viticultura, virando uma maior quota do seu mercado para a Região Demarcada do Douro. Este consórcio tem diversos objetivos, nomeadamente a implementação das ferramentas de processamento de dados; desenvolvimento de um teste em grande escala (> 100ha); customização das ferramentas existentes às especificidades da viticultura em encosta; desenvolvimento e implementação de uma aplicação web de disseminação de dados para o utilizador final (MAPP).

Estes objetivos visam ter aplicação na gestão do património, especialmente na elaboração de cartografia para projetos de implementação de vinha nova, cartas de risco de deslizamento, tratamento seletivo da vinha, deteção automática de falhas, vindima seletiva organizada por classes de vigor vegetativo. Estes objetivos e aplicações constituem ferramentas para a viticultura de precisão, promovendo a sustentabilidade do sector vitivinícola e uma gestão mais eficiente do património, como já referido anteriormente, potencializando o aumento do valor de produção.

Inicialmente, os *Drones* estavam projetados para fins militares (reconhecimento, transporte de armas e etc.) contudo, à medida que a tecnologia se foi desenvolvendo, a sua aplicação começou a ser mais difusa (nomeadamente no auxílio à vigilância, na cartografia, em missões de busca e resgate, controlo de tráfego urbano e na agricultura – especialmente agricultura de precisão) (Silva, *et al.*, 2014). O número de aplicações com os *Drones* aumenta, quando falamos destas naves equipadas com câmaras. A facilidade de obtenção de imagens aliadas a técnicas computacionais permitem avanços ainda maiores em diversas áreas científicas.

“Atualmente a sua aplicabilidade estende aos mais variados ramos, podendo ser encontrada em diversa literatura científica: agricultura de precisão (Berni *et al.*, 2009; Gini *et*

*al.*, 2012), florestas (Restas, 2006; Grenzdörffer *et al.*, 2008), manutenção de infraestruturas (Pagnano *et al.*, 2013), arqueologia (Lambers *et al.*, 2007), ambiente (Thamm & Judex, 2006), hidrografia (Ludwig *et al.*, 2003, Templeton *et al.*, 2014), reconstrução tridimensional (Wang & Li, 2007; Remondino *et al.*, 2011).” (in Felizardo, B., 2016, pág.11).

Devido ao estado de evolução e popularização, neste momento, os *Drones* estão causando uma revolução na indústria aeronáutica, pois surgem como novas plataformas para a aquisição remota, tendo uma enorme capacidade para a elaboração de mapas com enorme pormenor, qualidade, resolução. Para além de possibilitar a captação de pontos altimétricos e planimétricos. Com estas ferramentas e através de fotos verticais, possibilita-se a criação de cartografia digital.

Atualmente, no mercado, existem diversos exemplares de *Drones* com características variadas, preços e funcionalidades (Figura 7).



Figura 7 - Exemplos de drones.

Estes equipamentos são cada vez mais utilizados na agricultura, tornando-se um excelente mecanismo, conseguindo desempenhar uma série de funções que antes precisavam de equipamentos distintos. À medida que um *Drone* sobrevoa uma determinada área agrícola consegue realizar múltiplas tarefas como por exemplo: facilidade de deteção e contaminação de pragas; proporciona um maior controle sobre a produção; permite um mapeamento mais detalhado da região; previsão de produção (acompanhamento da plantações e comparação entre a meta e a realidade); cadastro ambiental rural; contagem de gado e etc.

Os *Drones* têm vantagens e desvantagens na sua utilização. Algumas das vantagens são: (1) preenchimento das lacunas entre escalas (observações de pequena escala permitem completar as observações a grande escala, altitude e até mesmo via satélite) (Lucieer, *et al.* 2014); (2) conseguem alcançar áreas de difícil acesso e ambientes de grande perigo (desastres naturais, incêndios, vulcões); (3) capacidade para a recolha de dados de campo de maneira automática; (4) baixo custo de produção (*hardware*); (5) facilidade de observação “*in situ*”, o que reduz o custo das operações (Gonçalves, & Henriques, 2015). A sua principal desvantagem prende-se com o facto de só poder ser utilizado em condições meteorológicas favoráveis (o vento dificulta a sua operabilidade e o nevoeiro diminui o seu *performance* ao reduzir o sinal de GPS do equipamento).



“O limite da distância de comunicação destas aeronaves é uma limitação que apesar do constante desenvolvimento, através por exemplo da implementação de sistemas FPV (First Person View) obriga a realização do voo na linha de observação (line-of-sight) do utilizador (Eisenbeiß, H., 2009). A comunicação rádio e da telemetria vai depender também da distância entre a Estação de Controlo e o VANT reduzindo assim a distância da operabilidade entre o mecanismo e o utilizador.” (in Felizardo, B. 2016, pág.13) (Figura 8).

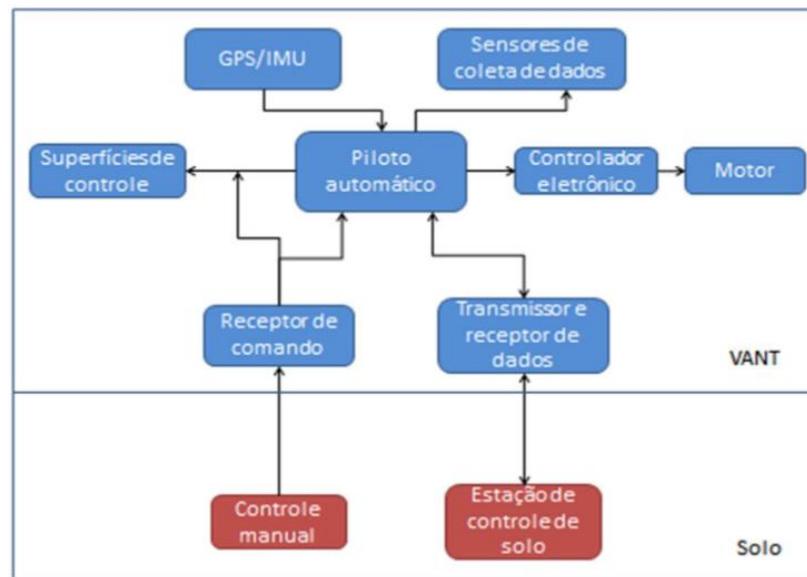


Figura 8 - Esquema de operabilidade do equipamento Drone. Margarete Maria

Relativamente à legislação para estes equipamentos, observa-se diversas fases na implementação legal do estatuto dos VANTS, em diversos países. Nos países mais desenvolvidos, que já utilizam esta tecnologia há mais tempo, o seu uso já se encontra regulamentado (exemplo da Espanha, França, Suécia, Alemanha e Reino Unido) (Miranda, 2014). Diversos organismos internacionais cooperam para que estes equipamentos sejam regulados, maioritariamente por motivos de segurança. Estes organismos querem também organizar os VANT por categorias no mercado, de forma a adaptar o seu uso em locais permitidos com base nas especificidades de cada *Drone*. Nomeadamente em Portugal, a utilização destes equipamentos já se encontra legislada no Diário da República.

## 1.2. SfM (Structure from Motion)

A última década testemunhou uma revolução tecnológica na área da geomática, área que está transformando a forma de construção de modelos digitais de elevação, assim como a análise dos processos geomorfológicos (Westboy, *et al.*, 2012). Com o desenvolvimento tecnológico e através do uso da máquina fotográfica, de um *smartphone* (Micheletti, *et al.*,

2015) ou de métodos de deteção remota (como já referido anteriormente, os *Drones*), é possível gerar de modelos tridimensionais (3D) com elevação. Estes modelos são construídos através de *softwares* específicos que incorporam correção geométrica, orto-retificação de imagens e processos de triangulação (Verhoeven, et al., 2013).

Para a modelação 3D, é preciso pelo menos duas perspetivas de um ponto na imagem, o conhecimento da orientação exterior e interior da imagem. Numa visão computacional estas orientações são usualmente combinadas na *projection matrices of the images*, processo crucial para a aborgadem *Structure from Motion (SfM)* (Verhoeven, et al., 2013).

A tecnologia *Drone* aliada ao método *SfM* pode fornecer um meio económico com menos custos e mais eficiente para adquirir dados complexos 3D, com enorme precisão da superfície terrestre (d'Oleire-Oltmanns *et al.*, 2012).

A técnica *SfM* difere da fotogrametria convencional em diversos aspetos. A geometria da “cena”, as posições da câmara e orientação da mesma são resolvidas automaticamente sem a necessidade de especificar à priori uma rede de alvos 3D. Em vez disso, estas tarefas são resolvidas simultaneamente usando um procedimento de ajuste da câmara, guardando as imagens numa base de dados, sendo estas extraídas a partir de uma sobreposição de imagens, até que existam pontos suficientes da mesma imagem para a construção 3D (Snavely, 2008).

Este método utiliza imagens obtidas em diversos pontos de vista, com o objetivo de restituição da superfície ou da geometria tridimensional (3D), da superfície ou de um objeto (Fonstad, *et al.*, 2013). Esta técnica baseia-se em algoritmos capazes de detetar “*local features*” (elementos de um lugar em específico) das imagens recolhidas, correspondendo os seus pontos bidimensionais (2D) comuns em todas as imagens que se repetem. Após este processo, o método *SfM* interliga os pontos comuns, utilizando coordenadas locais, produzindo uma nuvem complexa de pontos 3D representando a geometria e estrutura da “cena” (Verhoeven, *et al.*, 2013). É de referir que esta nuvem tem mais fiabilidade e rigor quanto maior for a sobreposição das imagens captadas (Figura 9) (Westboy, *et al.*, 2012).

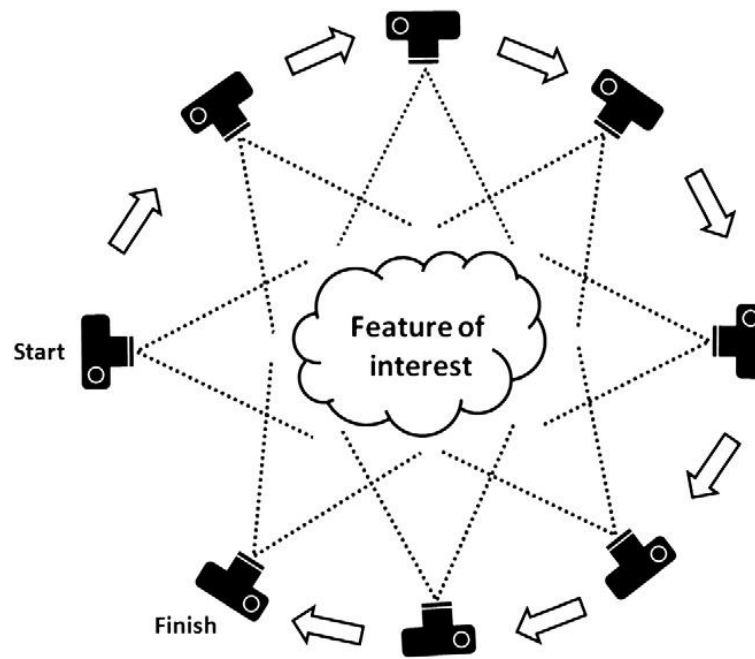


Figura 9 - A técnica SfM requiere o input de várias fotografias do mesmo ponto de interesse, para depois proceder a uma sobreposição das mesmas para a reconstrução tridimensional (adaptado de Westboy, et al., 2012).

Este método tem obtido grande aplicabilidade e dimensão em diversas áreas das ciências, como também tem permitido estudos desenvolvidos nas áreas das geociências computacionais. Autores como Westboy, *et al.*, 2012; Fonstad, *et al.*, 2013; Snavely, 2008; Verhoeven, *et al.*, 2013 têm produzido estudos comparativos entre as diferenças entre a técnica SfM e a estação LiDAR (figura 8 apresenta algumas distinções). Todos estes autores parecem chegar à conclusão que há um menor investimento económico em utilizar o método *Structure from Motion* relativamente ao LiDAR, sendo que na maior parte das vezes os dados provenientes desta técnica SfM são de qualidade e detalhe superiores. Relativamente à densidade de pontos conseguida a estação LiDAR continua a ter maior sucesso (Fonstad, *et al.*, 2013) (Figura 10).

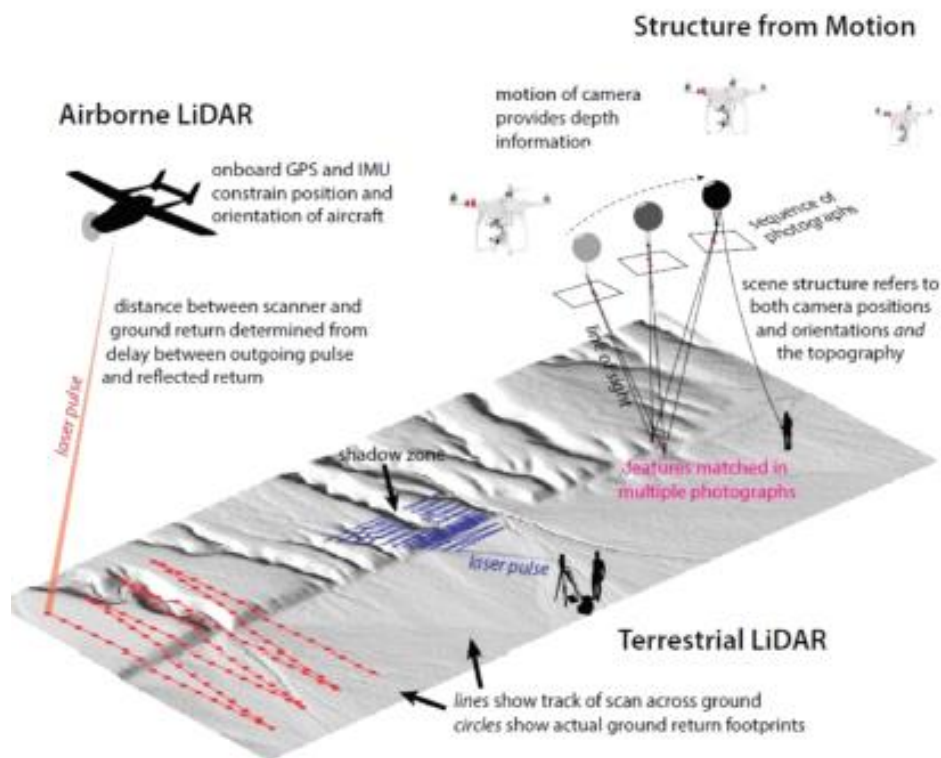


Figura 10 - Comparativos entre a estação LiDAR e técnica SfM. (adaptado de Johnson, et al., 2014, p. 2.)

Diversos autores como Westoby, *et al.*, 2012; Verhoeven, *et al.*, 2013; Fonstad *et al.*, 2013; Johnson *et al.*, 2014, têm implementado discussões acerca do método de processamento da técnica SfM, tendo diversas interpretações, opções metodológicas e diversas etapas que se têm que concluir para obter o resultado final da técnica. Verhoeven, *et al.* 2013, revela uma abordagem completa e sucinta acerca do processamento da técnica SfM, onde subdivide várias etapas desde a aquisição de dados (imagens) até à geração do modelo tridimensional (Figura 11). Para uma melhor compreensão de como funcionam estas etapas, torna-se importante revelar como funcionam as mesmas.

Depois de obter as imagens, o primeiro procedimento que surge é a “*Feature detection*”, ou seja, detecção de elementos. O sucesso nesta etapa vai variar de acordo com a complexidade computacional e do tipo de elementos a detetar dos dados obtidos. Neste processo são aplicados diversos pontos de interesse ou “pontos-chave”, (*keypoints*) que correspondem a localizações excepcionais e de textura diferente dos restantes. Estes pontos de interesse devem estar estáveis na imagem (a nível da iluminação, ruído, cor, geometria) e na escala, de modo a que sejam reproduzíveis nas diferentes condições de cada imagem (Verhoeven, *et al.*, 2013). São utilizados diversos algoritmos para calcular os *keypoints*. O mais comum é o algoritmo SIFT (*Scale Invariant Feature Transform* (Lowe, 2004) que é capaz de determinar descrição ao longo de diferentes condições e escala das imagens (Rossi, *et al.*, 2012 in Felizardo, 2016, pág. 47). São ainda conhecidos outros algoritmos como o SURF (*Speeded-up Robust Features* (Bay, *et al.*, 2008), e o ASIFT (*Affine SIFT* (Morel & Yu, 2009; Yu & Morel, 2011).

Na etapa “*Feature description*” (descrição de elementos), visa-se a correspondência entre os pontos de interesse. A intenção é que o algoritmo encontre quais os *keypoints* que são representados bidimensionalmente 2D pelo mesmo ponto físico 3D para então proceder à sua descrição (Verhoeven, *et al.*, 2013). Esta etapa é ajudada por descritores/vetores de elementos (*feature descriptors*, *feature vectors*). Estes algoritmos calculam o vetor do elemento com as características locais, visando uma correção local de pixéis à volta de cada *keypoint* (ponto de interesse).

Estes algoritmos calculam o vetor do elemento com as características locais, visando uma correção local de pixéis à volta de cada *keypoint* (ponto de interesse).

A 3ª etapa é “*Descriptor matching*” (correspondência dos descritores). Nesta fase os vetores descritivos são ligados entre as diversas imagens (Figura 12), através da associação de *Keypoints* (Verhoeven, *et al.*, 2013).

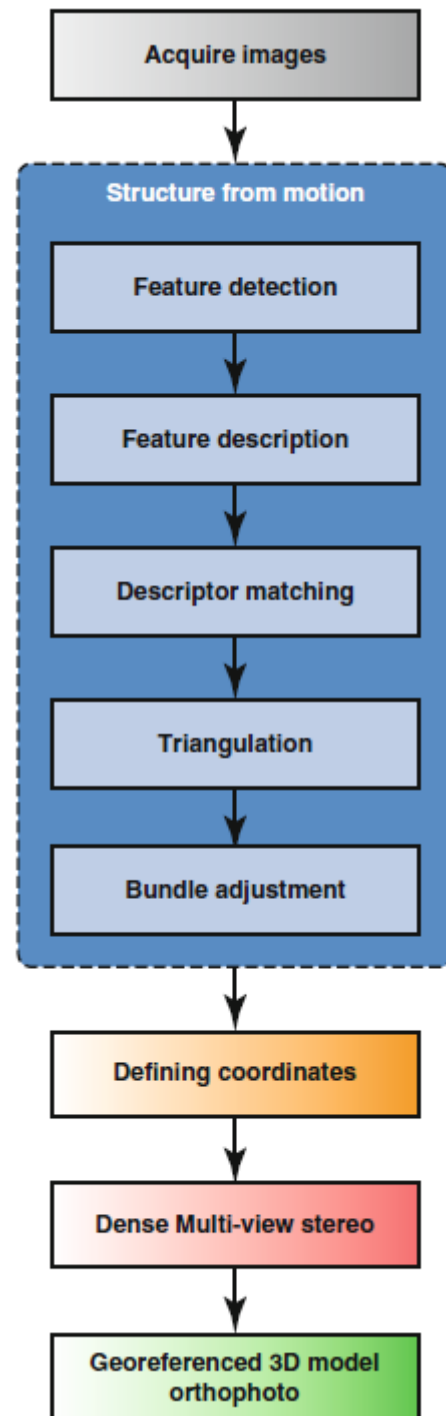


Figura 11 - Etapas do processo SfM + MVS (adaptado de Verhoeven, *et al.* 2013)

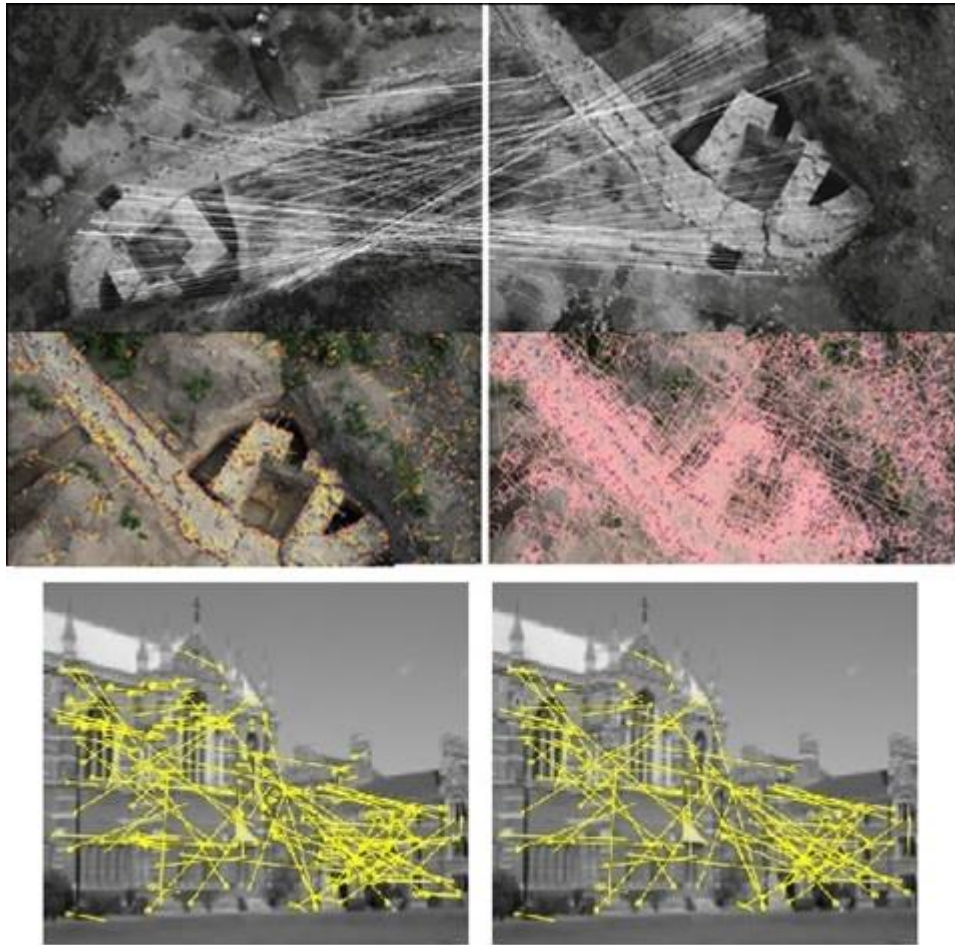


Figura 12 - Detecção e correspondência de pontos de interesse em comum, realizado com base no algoritmo ASFIT. extraído de Verhoeven, et al., (2013).

Na etapa da **“Triangulation”** (Triangulação), a técnica utilizada permite calcular a localização, atribuindo coordenadas aos pontos, criando uma nuvem 3D que visa representar a estrutura da cena (Verhoeven, et al., 2013). Esta etapa exige o conhecimento quer da orientação externa quer da orientação interna da imagem, que aparece da combinação de todas as orientações relativas em pares sob a forma de matriz fundamental (Felizardo, 2016).

A etapa **“Bundle adjustment”** (ajustamento conjunto) é a fase do processo em que é necessário tratar das imagens como um conjunto (*bundle*). Até aqui as imagens recolhidas eram analisadas aos pares, o que não permite a utilização da sobreposição de imagens. Esta técnica que se ajusta em conjunto, melhora a estrutura 3D e a matriz de todas as imagens em simultâneo, diminuindo assim os erros de reprojecção e a distância entre os pontos verificados nos planos de imagem (Verhoeven, et al., 2013). O mesmo autor acrescenta ainda que é possível recuperar a estrutura da cena e as matrizes de projecção (através da correspondência de imagens), sem ter o conhecimento das posições da câmara e orientação interna, excluindo

ou pondo de lado a hipótese de recalibração da câmara fotográfica durante a obtenção dos dados (Figura 13).

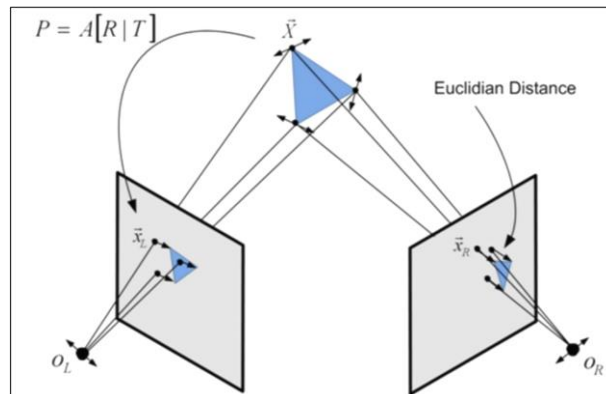


Figura 13 - Esquemática do ajuste de imagens em conjunto (Bundle adjustment) Fonte: <http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/fichiers/25229/ch06.html#d0e1030> (retirado de Felizardo, B., 2016)

É importante compreender que o *output* da técnica *SfM* é caracterizado por ser ambíguo na escala da cena representa. Por outras palavras, as projeções dos pontos da cena são apresentadas na escala, sendo que o sistema de coordenadas locais é adaptado à realidade. De referir que a escala é mais exata quanto maior for o rigor dos dados adicionados para tratamento de imagem (Verhoeven, *et al.*, 2013). O mesmo autor refere que é possível aumentar a exatidão da técnica *SfM* acrescentando pontos de controlo, ou *ground control points*<sup>3</sup> (GCP), ou posições com elevada precisão na câmara.

A utilização de pontos de controlo é um processo que ocorre antes da aquisição dos dados. Através da utilização de um GPS de alta precisão, são georreferenciados pontos no terreno, identificando-os de forma a serem visíveis nas imagens capturadas. A utilização destes pontos de controlo permite minimizar os erros de desvios na câmara fotográfica e localizações pontuais, desviando-se dos erros do *bundle adjustment*, georreferenciando diretamente o modelo digital final (Remondino *et al.*, 2012).

Depois de gerados estes passos todos da técnica *SfM*, o *output*, um modelo 3D georreferenciado, sob forma de Modelo Digital de Terreno (MDT), tendo em conta que representa toda a superfície, todas as estruturas antrópicas e naturais da superfície terrestre. Através deste resultado final podemos tirar diversas relações, como podem ser gerados outros modelos de enorme exatidão exportados a partir deste.

<sup>3</sup> Ground Control Points (GCP), são pontos de controlo. São pontos georreferenciados, no solo, onde a coordenada geográfica é precisa e tem máximo detalhe. Revela-se uma informação crucial para orto retificar e corrigir geometricamente a fotografia aérea ou de satélite. Fonte: <http://www.compassdatainc.com/what-are-ground-control-points/>



## 2. Modelos Digitais de Elevação

A preocupação com a representação de informação espacial já não é de agora. Desde a década de 1950 têm surgido muitas técnicas de representação digital de terreno. Estas vêm sendo desenvolvidas graças aos progressos tecnológicos e da computação gráfica. A representação por curvas de nível deixou de ser a única forma de representação da realidade, visto que os computadores conseguem elaborar MDE (Modelos Digitais de Elevação) (Oliveira, 2014).

As superfícies digitais têm como objetivo a representação de superfícies de forma discreta a partir de uma quantidade finita de dados, sendo representadas matematicamente e graficamente. Os modelos digitais são um conjunto de pontos com posição planimétrica e elevação conhecidos (pontos hipsométricos ou de elevação), que compõem de forma fiável uma superfície com o recurso a uma função matemática (Hatzopoulos, 2008).

O MDE é um termo geral utilizado para representar qualquer tipo de dados de elevação da superfície terrestre. No entanto diferentes autores diferem na conotação dos modelos, uma vez que existem várias denominações, tais como: MDE (Modelo Digital de Elevação), MDT (Modelo Digital de Terreno) e MDS (Modelo Digital de Superfície) (Lopes, M., 2015). O MDT diferencia-se do MDE pois este representa a superfície física do terreno, sem considerar a vegetação ou estruturas artificiais. O MDS é o contrário, pois varia do MDT e MDE ao considerar a elevação de cada ponto acima da área do terreno, ou seja, edifícios, árvores, torres ou outra qualquer estrutura que esteja elevada acima do terreno. (Oliveira, *et al* 2012) (Figura 14).

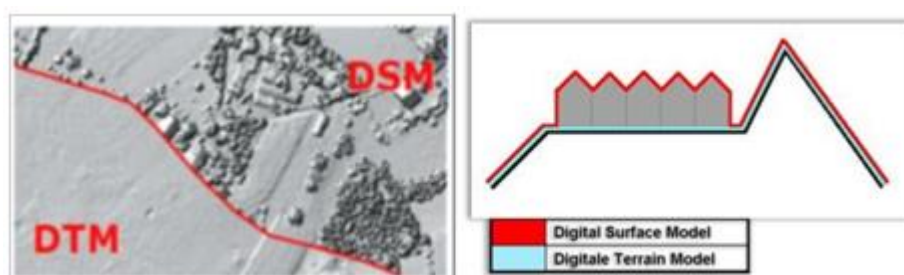


Figura 14 - Diferenças entre MDE e MDT. 1 - Extraído de Felizardo, 2016. 2 - Extraído do Laboratório de Geomática/PMI/EPUSP.

Os MDE's são modelos que englobam diversas etapas e tarefas, desde a sua construção à sua aplicação (Figura 15). A obtenção de dados para a construção dos modelos, torna-se essencial. É importante arranjar dados fidedignos, no entanto, a aquisição destes dados trazem sempre erros. De salientar que os erros nos modelos são inevitáveis, pois os modelos visam representar uma visão generalizada da realidade. No entanto, com um bom



processamento dos dados e dependendo da recolha dos mesmos, leva à reprodução de modelos com grande exatidão (Pinheiro, [et al] 2012). Os modelos apenas são úteis dependendo da quantidade de erros que o modelo original tem.

Os MDE's podem ser obtidos por várias técnicas (Hutchinson & Gallant, 2000), pela interpolação de feições vetoriais (pontos cotados, curvas de nível e hidrografia) ou diretamente de sensores remotos. (in Pinheiro, et al 2012). No entanto, Nelson et al, (2009) faz um estudo onde, engloba os levantamentos de dados através de: levantamentos de campo (Peucker et al, 1978; Niewinski, 2004); mapas topográficos existentes (Gooch et al, 1999; Henry et al, 2002; Fabris & Pesci, 2005; Hladik & Alber, 2012) e através da deteção remota (Huising & Gomes Pereira, 1998; Wehr & Lohr, 1999; Eisenbeiss & Zhang, 2006; Guarnieri et al, 2009). Para a obtenção destes dados, utilizam-se métodos como por exemplo: o LiDAR, os sonares e os radares (Pinheiro, H., et al 2012). A utilização dos modelos prende-se com a resolução, pois o seu funcionamento trará diversas aplicabilidades na área de representação de digital da realidade.

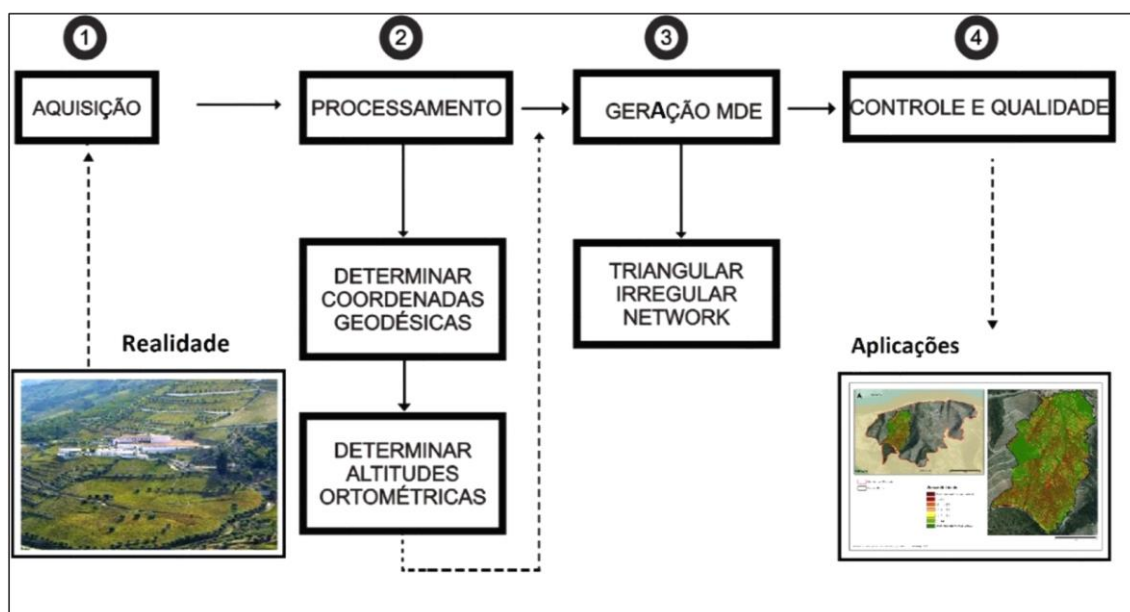


Figura 15 - Etapas de processamento de construção de um MDE. Extraído de Felizardo, (2016).

### 3. Enquadramento Teórico do Conceito “Risco”; Movimentos de Vertente; Algoritmos de Modelação Hidrológica

Como refere Rebelo (2001) a noção de *risco* é uma noção pré-científica. Já se começou a falar de risco mesmo antes de este se formar como ciência que visa a análise, avaliação e gestão de riscos. Na etapa da análise visa-se a identificação dos perigos e possíveis consequências, bem como a identificação da população exposta de modo a fazer uma estimativa do risco. Na etapa da avaliação, o objetivo é a valoração dos riscos. Na gestão, o objetivo passa pelo controlo dos riscos identificados para um caso concreto.

Certas regiões são mais propensas do que outras relativamente à ocorrência de movimentos de vertente., com danos significativos em diversos setores da sociedade, logo o seu estudo, análise e mitigação tornam-se imperativos.

Bateira *et al.* (2011) analisam os movimentos de vertente na Região Demarcada do Douro e dizem que os movimentos mais frequentes são os deslizamentos, os fluxos e os movimentos complexos.

#### 3.1. Conceito de Risco

Esta discussão com o termo do risco, tem com objetivo uma pequena introdução ao tema de movimentos de vertente, pois o risco está na base de tudo. O risco advém de dois pontos fundamentais: (i) a probabilidade de ocorrência de um fenómeno natural danoso; (ii) consequências indesejadas decorrentes da atividade de um fenómeno natural particular (Zêzere, 2005).

O risco associado aos movimentos de vertente é muitas vezes subestimado por diversos fatores entre os quais a ignorância generalizada acerca da natureza, significado e causas destes movimentos aliados à frequente atribuição a outros fatores de desencadeamento (Zêzere, 1997). Dentro dos fatores de desencadeamento podemos referir a precipitação, a erosão marinha, a atividade sísmica, vulcânica e ação antrópica (Felizardo, 2016).

Em áreas suscetíveis de instabilidade, é necessário um profundo conhecimento do funcionamento do fenómeno natural e das suas consequências para uma correta avaliação, de modo a mitigar os seus prejuízos, para uma melhor gestão do território.

O risco será então *“a possibilidade da ocorrência de consequências gravosas, económicas ou mesmo para a segurança das pessoas, em resultado do desencadeamento de um fenómeno natural ou induzido pela atividade antrópica”* (Zêzere, 1997).

Zêzere (1997) adaptou um esquema conceptual do termo risco (*risk*) (figura 14), onde dá uma explicação dos termos que o compõem. O termo **Perigosidade** (*P, hazard*) é a probabilidade de ocorrência de um fenómeno potencialmente destruidor, num determinado período de tempo e espaço. (Varnes, 1984). Este termo está dependente da magnitude dos processos, sejam elas antrópicas ou naturais.

O termo **Suscetibilidade** (*S, susceptibility*) é definido como sendo a *“probabilidade espacial de ocorrência de um determinado fenómeno numa dada área com base nos fatores condicionantes do terreno, independentemente do seu período de recorrência.”* (Zêzere, 2005, p.81).

O termo **Vulnerabilidade** (*V, vulnerability*) revela o *“grau de perda de um elemento ou conjunto de elementos em risco, em resultado da ocorrência de um fenómeno natural de determinada magnitude.”* (Zêzere, 2005, p.81) A vulnerabilidade é expressa numa escala de 0 a 1, onde 0 é sem perda e 1 é perda total.

Deste modo, afirmar-se que o conceito de risco é o produto da Perigosidade pela Vulnerabilidade (Zêzere, 1997) multiplicado pelos elementos em risco representado pela seguinte fórmula:

$$\text{Risco} = \text{“Perigosidade”} \times \text{“Vulnerabilidade”} \times \text{“Elementos de Risco”}$$

A figura 16 permite um quadro conceptual do termo risco.



Figura 16 - Esquema conceptual do conceito "risco". (adaptado de Zêzere, 2005)

## 3.2 Movimentos de vertente

### 3.2.1. Classificação de movimentos de vertente

O conceito de movimento de vertente foi alvo de discussão ao longo da última década, principalmente na literatura anglo-saxónica, causando problemas na terminologia do termo *landslide*, tendo sido adotada, posteriormente, uma definição internacional, que fosse de encontro às diferentes visões propostas por diversos autores. Numa utilização restrita (anglo-saxónica): "movimento relativamente rápido que envolve uma rutura. O movimento ocorre ao longo de uma ou várias superfícies individualizadas, que delimitam a massa que está em movimento" (Hutchinson, 1968).

Numa utilização com um sentido mais amplo, universal (adotada pela *Working Party on World Landslide Inventory*, resultante da Associação Internacional de Engenharia Geológica, pela UNDRO e pela UNESCO): "Movimento de descida, numa vertente, de uma massa de rocha ou solo. O centro de gravidade do material afetado progride de jusante e para o exterior." (Terzaghi, 1953; Varnes, 1978; Cruden, 1991).

A tabela 2 faz um histórico das classificações mais exploradas ao longo do tempo bem como os critérios de classificação para os mesmos.

*As classificações de movimentos de vertente mais divulgadas e adoptadas*

Classificação	Objecto da classificação	Critérios principais de discriminação	Critérios secundários de discriminação	Classes principais
Hutchinson (1968)	movimentos de massa	- tipo de mecanismo - morfologia do movimento	- velocidade do movimento - tipo de material	- <i>creep</i> - processos ligados à acção da congelação-degelo - deslizamentos - desabamentos - subsidência
Carson e Kirkby (1972)	movimentos de massa	- tipo de mecanismo	- velocidade do movimento - conteúdo em água no terreno	- escoada - deslizamento - expansão-retracção de solos
Nemcok, Pasek e Rybar (1972)	movimentos de massa	- tipo de mecanismo	- amplitude do movimento - velocidade do movimento	- <i>creep</i> - deslizamento - escoada - desabamento
Flageollet (1989)	movimentos de terreno	- tipo de mecanismo	- amplitude do movimento - gravidade do movimento	- subsidência - expansão-retracção de solos - deformações lentas de vertente - desabamentos - deslizamentos - escoadas
Hutchinson (1988)	movimentos de vertente	- morfologia do movimento	- tipo de mecanismo - tipo de material - amplitude do movimento	- empolamento - <i>creep</i> - <i>sagging</i> em vertentes montanhosas - deslizamentos - movimentos com forma de escoada - balançamentos - desabamentos
Varnes (1978) WP/WLI (1993) Dikau <i>et al.</i> (1996)	movimentos de vertente ( <i>landslides</i> )	- tipo de mecanismo	- tipo de material	- desabamento - balançamento - deslizamento - expansão lateral - escoada
Cruden e Varnes (1996)	movimentos de vertente ( <i>landslides</i> )	- tipo de mecanismo	- tipo de material - actividade - velocidade - conteúdo em água no terreno	- desabamento - balançamento - deslizamento - expansão lateral - escoada

*Tabela 2 - Classificações de movimentos de vertentes mais divulgadas e adotadas Extraído de Zêzere (2005).*

Os movimentos de vertente podem ser associados a uma escala de velocidades, ou seja, cada tipo de movimento tem determinada velocidade, influenciada por diversos fatores. Cruden & Varnes (1996) propõem uma escala de classificação para a velocidade dos movimentos de terreno. (Figura 17)

Zêzere (2005) refere que os movimentos de vertentes podem também ser classificados consoante a sua profundidade. Os movimentos são considerados como superficiais quando a sua profundidade é inferior a 1,5. Os movimentos pouco profundos são aqueles que atingem entre 1,5 a 5m de profundidade. Os movimentos profundos são aqueles que atingem entre 5 a

20m de profundidade. Por fim os movimentos muito profundos são aqueles que excedem os 20m de profundidade.

Segundo (Zêzere, 2005), “há uma enorme abrangência nos movimentos. Podem surgir movimentos de vertente, terreno e de massa. Contudo a tipologia de movimentos de vertente aceite como mais correta é a classificação proposta por Dikau, R., [et. al.] (1996), pois é baseada nas classificações propostas por Varnes (1978) e WP/WLI (1993)”. A classificação atribuída por Varnes (1978) não foi das primeiras mas continua a servir de base para muitas outras pois o autor classifica os movimentos de vertentes atendendo a dois critérios: o tipo de movimento e o tipo de material deslocado. Este trabalho segue estas classificações em cima descritas.

Relativamente à discrepância de definições sobre movimentos, para Flageollet (Zêzere, 2005, p.37), os movimentos de terreno “englobam todas as formas de deslocação que se podem verificar (abatimentos, desabamentos, deslizamentos, escoadas, etc.) e todos os materiais passíveis de serem deslocados”. Conclui-se assim que para este autor, os movimentos de terreno, englobam (para além dos movimentos de vertente) deslocações com predominância vertical (abatimentos e assentamentos), como também movimentos associados à expansão-retração de solos argilosos (Pereira, 2009). Surge também Hutchinson (Zêzere, 2005, p.38) que define como movimento de massa “todos os movimentos afetados pela gravidade, com a exclusão daqueles onde o material é mobilizado por um agente de transporte, como gelo, a neve, água ou ar, designados por transporte em massa”.

Verifica-se então que há uma enorme abrangência no que toca ao tipo de movimento, surgindo classificações para os diversos movimentos. A tabela 3 faz uma síntese dos mesmos.

Escala de velocidades para os movimentos de vertente (Cruden e Varnes, 1996)

Classe de velocidade	Descrição	Velocidade (mm/seg)	Velocidade típica
7	Extrem.rápido		
6	Muito rápido	$5 \times 10^3$	5 m/seg
5	Rápido	$5 \times 10^1$	3 m/min
4	Moderado	$5 \times 10^{-1}$	1.8 m/hor
3	Lento	$5 \times 10^{-3}$	13 m/mês
2	Muito lento	$5 \times 10^{-5}$	1.6 m/ano
1	Extrem.lento	$5 \times 10^{-7}$	16 mm/ano

Definição das prováveis consequências destrutivas dos movimentos de vertente em função da respectiva velocidade

Classe de velocidade	Prováveis consequências destrutivas
7	Catástrofe de grande violência. Edifícios destruídos pelo impacto do material deslocado. Muitos mortos.
6	Perda de algumas vidas. Velocidade demasiado elevada para permitir o salvamento de toda a população.
5	Evacuação possível. Estruturas e equipamentos destruídos.
4	É possível manter temporariamente algumas estruturas.
3	Podem implementar-se medidas mitigadoras durante o movimento.
2	Algumas estruturas permanentes permanecem não afectadas pelo movimento.
1	Imperceptível sem instrumentação. A construção é possível com precauções.

Fonte: Cruden e Varnes, 1996

Figura 17 - Escala de velocidade para os movimentos de vertente. Adaptado (Cruden e Varnes, 1996).

TERMO:	ABRANGÊNCIA:
MOVIMENTOS DE VERTENTE (LANDSLIDES)	Desabamento Balançamento Deslizamento Expansão lateral Escoada
MOVIMENTOS DE TERRENO	Movimentos de vertente Subsidência (abatimentos; assentamentos) Expansão-retração em solos argilosos
MOVIMENTOS DE MASSA	Movimentos de terreno Reptação (creep) Movimentos associados ao gelo e à neve

Tabela 3 - Abrangência dos movimentos de vertente, movimentos de terreno e movimentos de massa, proposto por Zêzere (2005).

### 3.2.2. Tipos de movimento de vertente

A seguinte tabela revela a classificação dos tipos de movimentos de vertente de acordo com a classificação da UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI, 1993; Cruden & Varnes, 1996 in Zêzere, 1997). Os diversos tipos de movimentos de vertentes serão descritos separadamente, pois cada um possui características únicas que os fazem diferenciar uns dos outros (Tabela 4 e 6).

Tipo de mecanismo			Tipo de material	
			Substrato rochoso	Solos
				Predominantemente grosseiros      Predominantemente finos
Desabamento/Queda ( <i>fall</i> )			rochoso	de detritos      de solo
Balançamento ( <i>topple</i> )			rochoso	de detritos      de solo
Deslizamento ( <i>slide</i> )	Rotacional	Poucas unidades	rotacional rochoso	rotacional em detritos      rotacional em solo
	Translacional	Muitas unidades	translacional rochoso	translacional de detritos      translacional de solo
Expansão lateral ( <i>lateral spread</i> )			de rocha	de detritos      de solo
Escoada/fluxo ( <i>flow</i> )			de rocha	de detritos      de solo
			Reptação ( <i>creep</i> )	
Movimentos complexos ( <i>complex</i> )			Combinação mínima de dois mecanismos principais	

Tabela 4 - Classificação dos movimentos de vertente (adaptado de Varnes, 1978 e Dikau et al., 1996).

#### a) Desabamento

Um desabamento/queda (*fall*) é definido como “uma deslocação de solo ou rocha a partir de um abrupto, ao longo de uma superfície onde os movimentos tangenciais são nulos ou reduzidos. O material desloca-se predominantemente pelo ar, por queda, saltação ou rolamento” (WP/WLI, 1993, p.6-2). Existem critérios para a classificação de desabamentos.

Zêzere (2005) pondera quatro classificações para os mesmos, sendo elas: 1) material afetado (desabamento rochoso, desabamento de detritos, desabamento de terra); 2) geometria da rutura (planar, em cunha, em escadaria, vertical); 3) proveniência do material

desabado (desabamentos primários e desabamentos secundários); 4) volume do material afetado.

Este tipo de movimento geralmente caracteriza-se por velocidades rápidas ou muito rápidas, deslocado maioritariamente pelo ar, queda, rolamento ou saltação. Cruden & Varnes (1996) dizem que a queda livre de rochas e massas de solo ocorrem em vertentes cuja declividade ultrapassa os 76 graus. Referem ainda também que em vertentes com ângulos de 45 graus ou inferiores, as partículas passam a ter caminhos de movimentação denominados por rolamento, pois à medida que os saltos das partículas e a declividade diminuem estas partículas passam a atuar por rolamento.

Os desabamentos podem ocorrer em diversos locais, como por exemplo: escarpas, arribas costeiras, nos bordos de um planalto, em taludes de estradas, escavações impróprias, barrancos em margens de rios e etc.

#### **b) Balançamento**

Seguindo a classificação dada pela WP/WLI (1993), os balançamentos/tombamentos (topples) consistem numa “rotação de uma massa de solo ou rocha, a partir de um ponto ou eixo situado abaixo do centro de gravidade da massa afetada”. Varnes (1978) acrescenta dizendo que o movimento verifica-se por influência da gravidade e pela ação de forças laterais, exercidas, quer por unidades adjacentes, quer por fluídos presentes em diáclases e fraturas.

Este tipo de movimento é frequente em massas rochosas cujas descontinuidades estão inclinadas inversamente ao declive. Geralmente o material envolvido inclina-se para a frente, caindo pela base da vertente. Dikau *et al.* (1996) diz que este fenómeno ocorre em função da geometria da massa afetada e da orientação/extensão dos planos de estratificação dos solos e/ou diáclases. Este movimento ocorre em massas rochosas com descontinuidades inclinadas num sentido contrário ao declive.

Zêzere (2005), diz que estes movimentos são condicionados por influência da: i) força da gravidade; ii) força lateral exercida por unidades adjacentes; iii) força lateral exercida pela água presente em diáclases e fraturas da rocha. Refere ainda que estes movimentos desenvolvem-se lentamente e podem ou não evoluir para desabamentos ou deslizamentos, em função da geometria da massa movimentada, da superfície de separação e da orientação e extensão dos planos de estratificação e/ou diáclases.



### c) Deslizamentos

O deslizamento (slide) define-se como um movimento de solo ou rocha que ocorre predominantemente ao longo de planos de rutura ou de zonas relativamente estreitas, alvo de intensa deformação tangencial (WL/WLI, 1993b, p.6-2). Segundo Zêzere (2005), a massa deslocada durante o movimento apresenta graus de deformação bastante variáveis, consoante o tipo de deslizamento. Os critérios de subdivisão dos deslizamentos classificam-se em tipo de rutura tangencial e tipo de material afetado. Sendo assim, prossegue-se à seguinte divisão dos deslizamentos, como mostra a tabela 5.

*Classificação dos deslizamentos (adaptada de Dikau et al., 1996)*

TIPOS DE DESLIZAMENTOS		TIPO DE MATERIAL		
		ROCHA	DETRITOS	TERRA
ROTACIONAIS		simples múltiplo sucessivo	simples múltiplo sucessivo	simples múltiplo sucessivo
TRANSLACIONAIS	COM RUPTURA COMPÓSITA	deslizamento de rocha em bloco ( <i>block slide</i> )	deslizamento de detritos em bloco ( <i>block slide</i> )	deslizamento de solo em bloco ( <i>slab slide</i> )
	COM RUPTURA PLANAR	deslizamento de rocha ( <i>rock slide</i> )	deslizamento de detritos ( <i>debris slide</i> )	deslizamento lamacento ( <i>mudslide</i> )

*Tabela 5 - Classificação dos deslizamentos (adaptada da Dikau et al., 1996)*

#### c1) Deslizamentos rotacionais

Os deslizamentos rotacionais ocorrem ao longo de superfícies de rutura curvas, em meios geralmente homogêneos e isotrópicos (Sirieys, 1984 in Zêzere, 2000). A sua forma topográfica é característica: como o plano de deslizamento é côncavo, o movimento envolve uma rotação, materializada por um abatimento na parte montante do deslizamento e por um levantamento do seu sector frontal, formando aclives mais ou menos pronunciados (Záruba e Mencl, 1982; Hutchinson, 1988 in Zêzere, 2000). A classificação mais frequentemente utilizada foi proposta por Hutchinson (1968) e inclui os subtipos simples, múltiplos e sucessivos.

#### c2) Deslizamentos translacionais

Relativamente a este tipo de deslizamentos podemos classifica-los em dois tipos: um de rutura compósita e com rutura planar. Os deslizamentos de rutura compósita, encontram-se na transição entre os rotacionais e os translacionais mais típicos (planares) (Zêzere, 2000). O plano de rutura é constituído por duas secções: de forma circular ou planar com forte inclinação a montante, sendo a inclinação mais reduzida a jusante (Zêzere, 2005).

Os deslizamentos de rutura planar desenvolvem-se ao longo de superfícies de fraqueza marcadas por uma resistência ao corte reduzida, como falhas, planos de estratificação, diáclases ou o contacto entre uma cobertura detrítica e o substrato rochoso. Atendendo ao material afetado é possível elaborar-se uma divisão quanto aos mesmos: (i) deslizamentos de rocha (*rockslides*); (2) fluxos de detritos (*debris slides*); (3) fluxos de lama (*mudslides*).

#### **d) Expansão lateral**

Deslocação lateral de massas coesivas de solo ou rocha, combinada com uma subsidência geral no material brando subjacente, alvo de liquefação ou escoada (WP/WLI, 1993). Este movimento é marcado pela ausência de ruturas basais bem definidas. Este movimento pode subdividir-se em dois relativamente ao material afetado: (i) expansão lateral em rocha (equivale um movimento muito lento, resultante de deformações visco-plásticas profundas); (ii) expansão lateral em solo (movimento muito rápido, associado ao colapso, por liquefação, de uma camada de solo a uma certa profundidade, seguida do assentamento ou da rutura progressiva do material sobrejacente). (Zêzere, 2005).

#### **e) Escoada (Fluxos)**

Movimento espacialmente contínuo onde as superfícies de tensão tangencial são efémeras e mal preservadas. A distribuição das velocidades na massa afetada) assemelha-se à de um fluido viscoso (WP/WLI, 1993). As tensões são distribuídas por toda a massa afetada, sendo responsáveis por uma grande deformação interna dos materiais. Podem ser subdivididas em três tipos: (i) escoadas em rocha (*rock flows*); (ii) escoadas lamacentas (*mudflows; soil flows*); (iii) escoadas de detritos (*debris flows*).

As escoadas em rocha (*rock flows*) são deformações gravíticas profundas de tipo *creep*. Movimentos muito lentos, mais ou menos permanentes no tempo, em massas rochosas muito diaclasadas ou estratificadas, em vertentes montanhosas (Zêzere, 2005),

As escoadas lamacentas (*soil flows; earth flows*) são movimentos de escoada de massa de água com terrenos que contêm, pelo menos, 50% de partículas da dimensão da areia, silte e argila. A velocidade do movimento pode variar do muito lento a muito rápido (Zêzere, 2005),

As escoadas de detritos (*debris flows*) resultam de umas misturas de material fino (areia, silte, argila) e material grosseiro (calhaus, blocos), com água, formando uma massa que se desloca em função da força gravítica, normalmente por impulsos sucessivos (Zêzere, 1997).



### 3.2.3. Fatores desencadeantes de movimentos de vertente

Fazendo uma retrospectiva do que tem sido analisado até agora, existem fatores condicionantes e fatores desencadeantes de instabilidade. Torna-se complicado por vezes tentar definir qual o mecanismo desencadeante (*triggering factor*) pois as causas são múltiplas e ocorrem em simultâneo. Popescu (1994) sugere uma proposta sistematizada das causas dos movimentos de vertente: a) características do terreno; b) processos geomorfológicos; c) processos físicos; e d) processos antrópicos (Figura 18).

Elaborando uma boa identificação dos fatores que originam os movimentos de vertente, pode levar ao surgimento de uma boa base metodológica para a avaliação da suscetibilidade de estabilidade de vertentes.

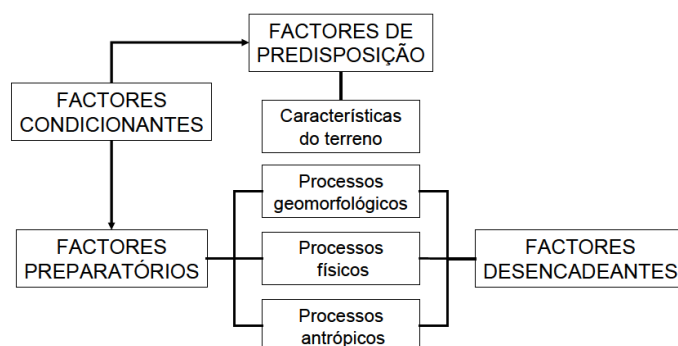


Figura 18 - Esquema conceptual à ocorrência de movimentos de vertente. Adaptado (Zêzere, 2005).

Os fatores condicionantes podem ser divididos em dois grupos, como mostra o esquema: fatores de predisposição (estatísticos) e fatores preparatórios (dinâmicos). Os fatores de predisposição prendem-se com as características do terreno, ou seja, a instabilidade deriva da variação espacial da suscetibilidade (Garcia, 2012). Não influenciam por si só a estabilidade e o desenvolvimento de movimentos de vertente sendo que também funcionam como engrenagem quanto atuando em conjunto com fatores dinâmicos. Os fatores preparatórios são dinâmicos e geralmente reduzem a estabilidade das vertentes, no entanto não têm responsabilidade direta pelo movimento (Crozier, 2004). Inserem-se neste grupo então, processos físicos (sismos, degelo), processos geomorfológicos (erosão, tectónica), desflorestação ou antrópicos (construção de sistemas de armação do terreno e etc.) (Garcia, 2012).

De acordo com a pesquisa elaborada, verifica-se que a precipitação surge como um dos principais fatores de instabilidade de vertentes, aliada, certas vezes, às atividades antrópicas. A intervenção humana potencia a obstrução de linhas de água (construções, aterros, concentração de águas de escoamento) e abertura de taludes em caminhos. A

distribuição espacial de ocorrências deste fenómeno é desigual no território português, pois há fatores condicionantes de instabilidade de vertentes. Para a região Norte de Portugal, Bateira e Soares (1997) analisam os principais fatores responsáveis pela ocorrência de movimentos de massa no Norte de Portugal, especificamente os fatores de ordem hidroclimática, e consideram que os episódios chuvosos são um “fator de ignição” que vai desencadear outros “fatores de risco”. Os dois autores afirmam que, independentemente do tipo de movimento de vertente em questão, estes têm o seu desenrolar na sequência de episódios chuvosos.

Referindo-se à região de Lisboa, Zêzere (2001) refere que a precipitação é referida na literatura científica como um dos principais fatores desencadeantes dos movimentos de vertente e afirma que esta tem um papel determinante na região a norte de Lisboa, sobretudo quando se trata de precipitações intensas.

Atendendo à presente dissertação verifica-se que estes fatores têm uma determinada importância na estabilidade de vertente. Sendo assim as áreas de contribuição e os declives ganham importância, pois são os subtemas que mereceram mais destaque. As áreas de contribuição surgem como um fator condicionante importante, pois definem e delimitam a localização de segmentos convergentes de forte concentração de fluxos superficiais, responsáveis pela saturação dos solos. (Fernandes, *et al.*, 2004). Por outro lado, os declives são também de estudo, pois podem desencadear movimentos por ação gravítica (Teixeira, 2012).

Neste projeto serão apresentados alguns parâmetros físicos das áreas de estudo, como por exemplo o peso específico do solo, a espessura, a condutividade hidráulica, a coesão e o ângulo de atrito interno.

#### 3.2.4. Estabilidade e rutura de vertentes

Faria, (2014) refere que os modelos de estabilidade **englobam e avaliam os parâmetros físicos e condicionantes de forma a avaliar a (in)estabilidade de vertentes**. Sabe-se que os movimentos surgem da existência de diversas tensões em vertentes ativas por ação natural, sendo estas tensões promotoras de instabilidade ou de estabilidade. A estabilidade é avaliada segundo o Fator de Segurança (FS), resultado da razão do somatório das tensões impulsionadoras de instabilidade (T) e as forças inversamente opostas, responsáveis pelo equilíbrio da vertente (chamadas forças de resistência ao cisalhamento ( $\tau$ )) (Felizardo, B., 2016). Traduz-se na seguinte equação:

Equação 1

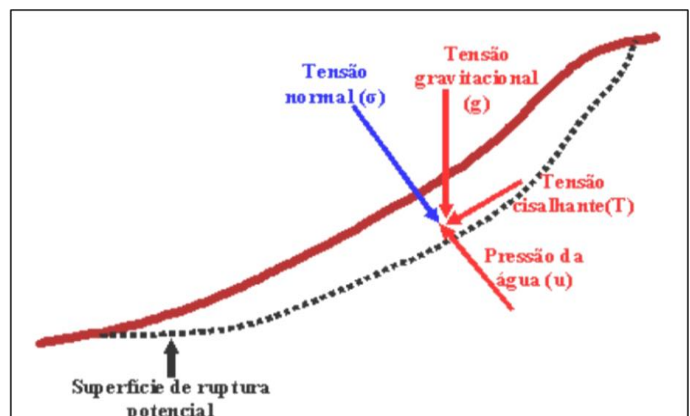
$$FS = \frac{\text{Força de Resistência}}{\text{Tensão de Cisalhamento}}$$

(adaptado de Dikau, R., 2004a)

Dikau (2004) coloca em prática a dita equação referindo que se as forças de tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) forem iguais às forças motoras (T), o valor do fator de segurança é igual a 1, encontra-se no limite de estabilidade. Se as forças são inferiores a 1 ( $FS < 1$ ) a vertente é considerada então instável. Quando é superior a 1 ( $FS > 1$ ), a vertente considera-se então estável, visto que a tensão de cisalhamento é superior à força de resistência. Selby, (1993) destaca que a estabilidade não é absoluta mas sim uma probabilidade de estabilidade que cresce à medida do aumento do FS.

O Fator de Segurança (FS) é uma teoria criada segundo o Modelo Bidimensional do Talude Infinito (Selby, M., 1993) elaborado por Coulomb em 1783 (demonstração na equação 2). Este modelo considera uma massa (ou bloco) de espessura uniforme e homogênea, em plano inclinado, em que atuam forças/tensões (Figura 21). Vieira (2007) revela que a força gravitacional (g), o peso do material (p), resultante da multiplicação da massa (m), atuam tanto paralelamente à vertente, contribuindo para a instabilidade, assim como no seu inverso, verticalmente, aumenta a estabilidade da vertente, ao proporcionar atrito do bloco com a superfície de inclinação (Figura 19).

Figura 19 - Esquema relativo às tensões que atuam numa superfície de ruptura potencial. As setas a vermelho representam as tensões que atuam para a promoção de instabilidade de vertentes. As setas a azul representam a manutenção da estabilidade da vertente. Adaptado de Selby, (1993) in Vieira (2007).



Equação 2

$$FS = c' + \sigma' \tan \Phi' / S$$

Ou seja:

S - resistência máxima ao cisalhamento (KN/m<sup>2</sup>; ou KPa);

c - coesão do solo (KPa);

$\sigma$  - tensão normal total da superfície de ruptura (KPa);

$\Phi$  - ângulo de atrito interno do solo (°).

Posteriormente, Terzaghi em 1925, publicou o conceito da tensão efetiva, considerando a força exercida pela pressão intersticial ( $\mu$ ):  $\sigma' = \sigma - \mu$  (Dikau, 2004). Com base neste parâmetro, a tensão normal é expressa como tensão normal efetiva ( $\sigma'$ ):

Equação 3

$$S = c' + \sigma' \tan \Phi'$$

Ou seja:

c' - coesão efetiva;

$\Phi'$  - Ângulo de atrito interno efetivo.

Com base nestas explicações todas, o Fator de Segurança, pode ser expresso na seguinte equação:

Equação 4

$$S = c + \sigma \tan \Phi$$

Ou seja:

$\sigma' = \gamma z \cos \beta^2$ ;

$S = \gamma z \cos \beta \sin \beta$ .

O parâmetro z representa a espessura do solo. Segundo Vieira (2007), em caso de impossibilidade de recolha deste parâmetro de forma perpendicular à superfície, este pode ser calculado por meio de medidas verticais do bloco (Figura 20). O parâmetro  $\gamma$  representa o peso volumétrico natural do solo.

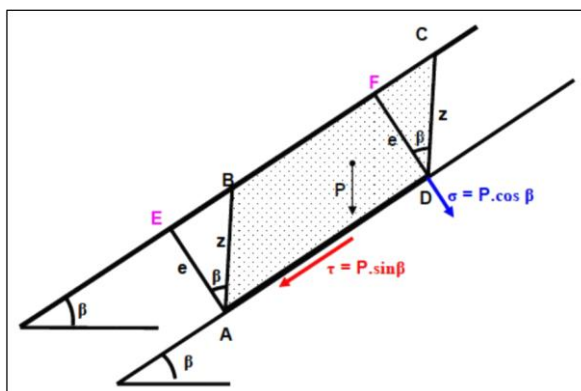


Figura 20 - Esquema de determinação da espessura do solo ( $z$ ). Adaptado de Selby, (1993), in Vieira (2007).

### 3.3. Algoritmos de Modelação hidrológica

A hidrologia sempre suscitou interesse de estudo por parte da civilização. A criação de modelos com intuito de representação da realidade hidrológica permite um melhor dimensionamento de projetos e investimentos associados a estas modelações. É necessário que os modelos de escoamento representem a realidade da melhor forma possível. A validação dos resultados de um modelo é extremamente difícil de executar, no entanto é recomendável, pois através da validação, podemos comparar a diferença entre modelos e quais oferecem os resultados mais precisos. Visto isto, é normal que alguns modelos de escoamento tenham melhor funcionamento que outros (Crombez, 2008).

Segundo Buarque *et al.*, (2009), uma das primeiras etapas de análise é a definição de direções de escoamento, pois derivando destas, pode-se calcular outros parâmetros, como a área de drenagem a montante de cada célula, delimitação de sub-bacias, definição de rede de drenagem determinação de comprimentos e declividades de cursos de água.

Consoante Crombez (2008), os algoritmos que modelam o escoamento são uma ferramenta de análise do terreno, utilizadas para modelar a transferência de água, sedimentos e afins. Cada algoritmo define que o fluxo de um determinado ponto, ou área, será distribuído para regiões vizinhas. O cálculo das áreas contributivas, provenientes de MDE, é uma das questões com mais ênfase na análise digital do terreno, tendo um leque de aplicações, tais como a análise da erosão do solo, hidrológica e geomorfológica (Qin & Zhan, 2012). Segundo Tarboton (1997), a área contribuinte para cada pixel pode ser estimada como o produto do número de pixéis que contribuem com a drenagem para este pixel e área do mesmo.

Há uma grande variedade de métodos de definição das direções do fluxo com base em MDEs. Existem métodos com direção única e métodos com múltiplas direções. Os que utilizam direção única ocorrem por um critério de maior declividade, ou seja, o algoritmo transfere



todo o fluxo da célula central para um vizinho de elevação mais baixa. Os algoritmos de direção múltipla transferem o fluxo fracionadamente para vários vizinhos (Erskine [et al], 2006; Baurque [et al], (2009).

Os algoritmos de direção única são frequentemente usados devido à sua simplicidade e eficiência computacional, pois são modelos que imitam padrões de fluxos convergentes, revelando-se um mecanismo eficaz na identificação de redes de drenagem. Contudo, são em evitados em projetos de modelação hidrológica por apresentarem fluxos inconstantes (Crombez, 2008). O autor afirma ainda que por outro lado, os algoritmos de múltiplas direções são mais sofisticados, permitindo fluxos convergentes e divergentes, sendo esta última característica de dispersão desejável em variadas análises, acarretando maiores custos computacionais.

Os primeiros algoritmos para definir direções de escoamento a partir de um modelo digital de elevação surgiram ao longo da década de 1980 pela mão de autores como O'Callaghan e Mark (1984), Mark (1984) e Jenson e Domingues (1988). Com o desenrolar da tecnologia e dos anos, foram surgindo algumas modificações nestes algoritmos e desenvolvidos outros métodos, como nomeadamente a possibilidade de escoamento em múltiplas direções como se verifica em Quinn [et al], (1991), Freeman (1991) e Tarboton (1997).

É essencial uma boa definição do algoritmo de acordo com os objetivos que queremos, pois a escolha do mesmo influenciará o cálculo de área contribuinte, área de abrangência e outros atributos topográficos. Com base nesta descrição, verifica-se que é necessária uma boa análise dos *outputs* dos algoritmos e dos dados para melhor escolha dos mesmos.

Neste trabalho, optou-se pela análise e observação das divergências entre três algoritmos: D8 (*deterministic eight-neighbors*) de O'Callaghan e Mark, (1984), o  $D^\infty$  (*deterministic infinity*) de Tarboton, (1997) e o MFD (*multiple flow direction*) de Freeman, (1991).

### 3.3.1. Algoritmo Determinístico 8 (*deterministic eight-neighbors*)

O algoritmo D8 é dos algoritmos mais utilizados por causa da sua eficiência computacional e simplicidade de aplicação nos algoritmos de direção única. Este modelo direciona o fluxo até oito direções, optando somente um caminho, para a célula de menor declividade. (O'Callaghan and Mark, 1984). A declividade de uma linha ligando a célula central, a cada uma de suas vizinhas, é calculada e é identificada a célula vizinha para a qual a declividade é máxima (Mark, 1984; O'Callaghan e Mark, 1984 in Buarque et al., 2009). Este

algoritmo utiliza sempre a direção da descida mais íngreme. Surge como um mecanismo eficaz na identificação de redes de drenagem, analisando os cursos de água principal, estabelecendo uma boa mancha visual, a partir do qual, se pode compreender bem a ordem dos mesmos, deixando muitas vezes de parte os cursos de água subsidiários (Figura 21).

Este método tem a desvantagem de ser o produto da divisão do fluxo em somente uma das oito direções possíveis, separados por 45°. Devido a esta limitação, tem-se estudado e desenvolvido novos algoritmos que visam a atuação em múltiplas direções de fluxo, novos métodos de direcionamento e também métodos tubulares de fluxo (Brandão & Santos, 2009). Apesar de ser dos mais utilizados, em certos estudos onde se quer ter uma melhor percepção da rede de drenagem, este método é muitas vezes evitados pois a sua modelagem hidrológica apresenta fluxos inconstantes e irreais. (Erskine *et al.*, 2006; Pereira, 2013). Tem ainda o contra de não representar com perícia as reais direções do modelo, pois o caminho é só feito em oito direções somente, não permitindo bifurcação.



Figura 21 - Representação visual do processo do algoritmo Determinístico 8.

### 3.3.2. Algoritmo $D_{\infty}$ (*deterministic infinity*)

Este algoritmo distribui o fluxo em infinitas direções compreendidas entre 0 e 360 graus (Tarboton, 1997). É por assim dizer, o “oposto” do Determinístico de Oito Direções. Verifica-se que este algoritmo define um conjunto de linhas de água, no entanto, faz um contraste de certas linhas de drenagem em relação às outras, ou seja, identifica os cursos de água principal, os secundários, bem como aqueles que surjam no topo das vertentes, revelando-se mais pormenorizado. Este algoritmo explora mais o espaço do que o D8, pois assinala fluxos em caminhos e terraços agrícolas. Identifica muitas sub-bacias e micro bacias que não seriam possíveis de observar tão sucintamente, como por exemplo nos outros modelos (Erskine *et al.*, 2006; Pereira, 2013).

A criação deste algoritmo é uma extensão de modelos previamente realizados/estudados. Os métodos que geram um plano pelos quatro cantos dos pixels são suscetíveis a erros. Este algoritmo por sua vez ajusta o plano. Cria 3 pontos num pixel (tem 4 pontos). É através deste ajustamento que o modelo é criado. Atendendo a este mecanismo, o modelo pode apresentar fluxos inconstantes, não representando a realidade de maneira tão exata como se espera (Pereira, 2013; Erskine *et al.*, 2006; Tarboton, 1997) (Figura 22).

Tarboton (1997) refere que a criação deste método vem da necessidade: (1) de minimizar a dispersão do fluxo; (2) evitar disposição da orientação numérica das células do *grid*; (3) a precisão com que as direções do fluxo eram resolvidas; (4) uma estrutura *grid* simples e eficiente baseada em uma estruturação matriz; (5) robustez, capacidade para tratar de dados difíceis.

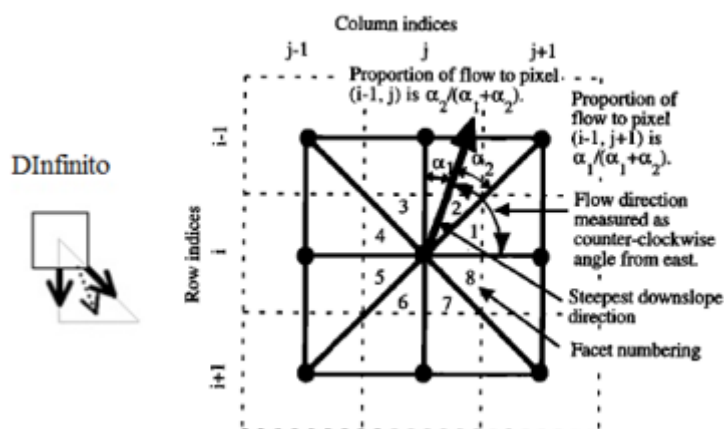


Figura 22 - Representação visual do algoritmo Dinfinito. Adaptado de Tarboton (1997).

### 3.3.3. Algoritmo MFD (multiple flow direction)

Com o intuito de contrariar os algoritmos de direção única, surgem os algoritmos de múltiplas direções. O MFD distribui o fluxo fraccionalmente para todas as células vizinhas inferiores com base na proporcionalidade das suas inclinações (Freeman, 1991). Veio contrariar o D8, pois a abordagem do D8 é uma simplificação da realidade, visto que o fluxo de uma determinada célula não segue concentrado para as oito células vizinhas. Este método de múltiplas direções visa combater este aspeto, fracionando o escoamento entre mais que uma célula vizinha (Tarboton, 1997; Quinn *et al.*, 1991; Seibert e McGlynn, 2007) (Figura 23).

Ao contrário do D8, este algoritmo, permite fluxos convergentes e divergentes, permitindo uma melhor análise visual. No entanto a principal desvantagem é que o fluxo de uma célula é encaminhado para as todas as células vizinhas e logo revelam-se fluxos mais dispersos, mais manchados, mais difusos. Permite também a bifurcação do escoamento superficial (Figura 24).

Numa simplificação, este algoritmo distribui o fluxo de escoamento para todos os vizinhos mais baixos, no que toca à elevação. De salientar que a aplicação deste método acarreta maiores custos computacionais.

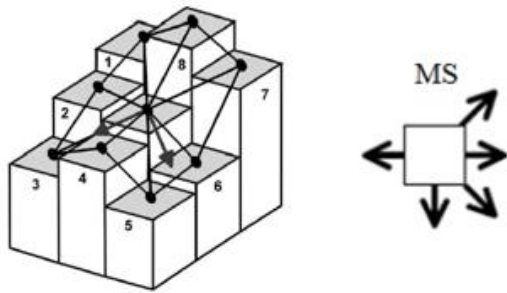


Figura 23 - Exemplo ilustrativo da construção de facetas triangulares a volta de uma célula. A direção do fluxo segue a célula de maior declividade entre dois pontos (exemplo da célula 5 e 6) ou para fora do ângulo de  $45^\circ$  (limitações de modelos de direção única) em questão (ex: triângulo entre o ponto 4 e 5). Desta maneira o fluxo é empurrado para as células vizinhas de declividade maior. Em último ponto, essa direção só recebe a mesma quantidade de área se a a mesma direção for determinada para duas facetas triangulares adjacentes. Esta previsão é do fluxo que vai para a célula 3 mas não o mesmo para a célula 5 e 6, pois a seta deveria estar a apontar para a descida mais íngreme (Seibert e McGlynn, 2007).

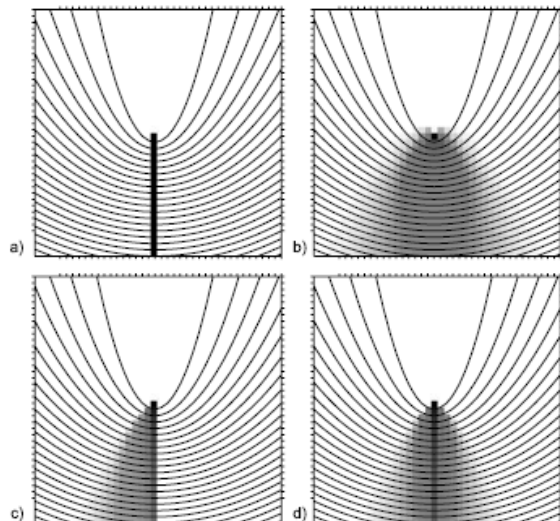


Figura 24 – Padrão de distribuição espacial dos fluxos dos diferentes algoritmos a partir de uma célula. **(a) D8; (b) MD8; (c)  $D^\infty$ ; (d)  $MD^\infty$ .** As porções variam entre 0 (branco) e 1 (preto). Adaptado de Seibert e McGlynn (2007)

#### 4. Metodologias de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente.

Os métodos de análise para a avaliação da suscetibilidade, são determinados pelo investigador, uma vez que os aspetos a analisar devem ser considerados pelo menos, de acordo com o que pretende, com os dados que tem e de acordo com a área de trabalho.

A avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente pode ser realizada através de duas abordagens diferentes: por método de cartografia **direta** e método de cartografia **indireta** (Figura 25).

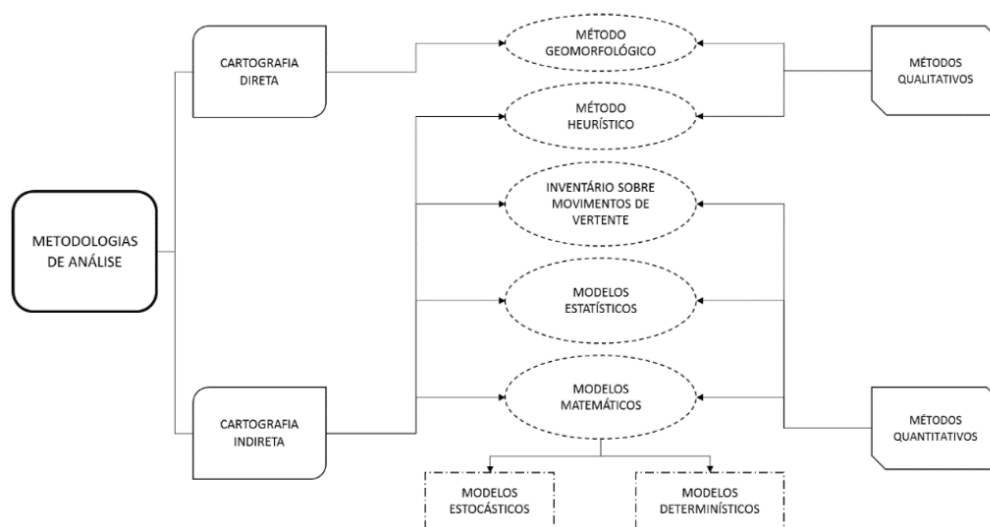


Figura 25 -Métodos de análise de suscetibilidade a movimentos de vertente. Adaptado Faria, (2014).

O método de cartografia direta tem como base a ponderação de fatores que é efetuada pelos técnicos que realizam os levantamentos. É um método experimental que varia de pessoa para pessoa, neste caso, quem realizou o inventário. Revela-se um processo demorado e difícil no que toca à validação de resultados, pois será sempre necessário uma nova ocorrência de movimentos.

O método de cartografia indireta baseiam-se nos fatores, mecanismos e causas que desencadeiam a instabilidade geomorfológica. A sua influência é determinada pela aplicação de modelos de **base física (determinísticos)** ou de **base estatística**. Estes fatores levam a uma normalização das metodologias, tornando os resultados mais objetivos. Estes mesmos resultados podem ser validados pela aplicação de técnicas já difundidas (Montgomery e Dietrich, 1994; Guzzetti, 2005).

O trabalho utilizou o modelo matemático de base física, SHALSTAB. A utilização deste modelo pretende analisar a distribuição da probabilidade de ocorrência de movimentos de vertentes.

Nestes modelos matemáticos de base física é essencial utilizar o inventário dos deslizamentos (é também de base estatística) e recorrer à validação dos resultados para uma leitura fidedigna (Meisina e Scarabelli, 2007, Pereira *et al.*, 2014).

Na Quinta do Bomfim utilizou-se ambos métodos, quantitativo e qualitativo. O método qualitativo surge como uma das metodologias mais simples dentro do grupo, pois depende da experiência do investigador relativamente à análise que elabora e zonamento. A utilização de mapas com grande detalhe no que toca à estabilidade de vertentes torna-se importante (Aleotti and Chowdhury, 1999). Os mapas elaborados com recurso a esta análise qualitativa baseiam-se essencialmente do conhecimento e do método de atuação do investigador das causas e fatores de instabilidade na área de estudo em questão (Guzzetti [et al.], 1999).

Autores como Westen *et al.*, (2006), afirmam que a falta de um inventário descritivo dos movimentos de vertente pode ter consequências entre as relações de vulnerabilidade e a validação dos mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente. É necessário que o inventário seja o mais detalhado possível, criando uma base de dados completa onde podemos usar e tratar da informação de maneira fidedigna.

#### 4.1. Modelo matemático de Base Física – SHALSTAB

Um dos primeiros modelos desenvolvidos para a avaliação da estabilidade de vertentes por meio de distribuição probabilística tendo por base, a teoria do talude infinito designou-se por Level I Stability Analysis - **LISA** (Calcaterra [et al.], 2004, in Vieira, B., 2007). Foram surgindo outros modelos nesta mesma linha de pesquisa sendo os de maior destaque: **SHALSTAB** - *Shallow Landslide Stability Analysis* (Dietrich *et al.*, 1995, Montgomery & Dietrich, 1994, Montgomery & Dietrich, 1989, Montgomery *et al.*, 1998), **dLSAM** - *Slope Instability Model* (Wu e Sidle, 1995), **SINMAP** - *Stability Index MAPping* (Pack *et al.*, 1998) e **TRIGRS** - *Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope Stability* (Iverson, 2000, Baum *et al.*, 2002, Baum *et al.*, 2008, Kim *et al.*, 2010, Liao *et al.*, 2011). (In Felizardo, B., 2016)

O modelo SHALSTAB será o adotado, pois a sua modelação permite uma boa análise, detalhada, tendo apresentado resultantes concretos e aceitáveis em estudos anteriores realizados na Região Demarcada do Douro. (Felizardo, 2016; Faria, 2014; Martins, 2015; Pimenta, 2011).

O modelo SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability*) é um modelo determinístico desenvolvido na década de 90 em estudos de Dietrich e Montgomery, tendo com objetivo a simulação da variação espacial da suscetibilidade a movimentos de vertente. É baseado no conceito “*steady-state*”, ou seja, as condições hidrológicas do modelo encontram-se no seu estado estacionário. O SHALSTAB é resultante da combinação entre dois modelos, um de estabilidade de vertentes (declives) e outro hidrológico (áreas contributivas). Ao compilar os dois modelos obtém-se o resultado final. Este resultado final é o que permite avaliar a suscetibilidade de ocorrência a movimentos de vertente.

#### 4.1.1. Modelo de estabilidade

O modelo de estabilidade estabelecido no SHALSTAB, que prevê a instabilidade a deslizamentos com base na precipitação crítica, inclui o Modelo do Talude Infinito (O’Loughlin, 1986) (ver subcapítulo 3.2.4 – Estabilidade e rutura de vertentes). A equação 5 resume a equação simplificada sem o parâmetro da coesão. A equação 6 é a continuidade da primeira, no entanto, com a adição do parâmetro da coesão. A sua integração na fórmula traz resultados mais precisos, uma vez que a coesão influencia a resistência cisalhamento.

Equação 5

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right)$$

Equação 6

$$\frac{h}{z} = \frac{C'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right)$$

Ou seja:

$\rho_s$  = densidade global do solo saturado ou peso específico do solo ( $\text{Kg/m}^3$ );

$g$  = aceleração gravitacional ( $\text{m/s}^2$ );

$z$  = espessura do solo (m);

$C'$  = coesão efetiva do solo (KPa) (no caso da equação 6);

$h$  = altura da coluna de água acima do plano de rutura (m);

$\rho_w$  = densidade da água ou peso específico da água ( $\text{Kg/m}^3$ );

$\Phi$  = ângulo de atrito interno do solo ( $^\circ$ ).

De destacar que esta equação tem maior ou menor estabilidade, dependendo da relação  $h/z$ . Quanto maior for esta relação maior será a instabilidade da vertente. Noutra perspetiva verifica-se também a instabilidade da vertente em relação ao seu declive, ou seja, à medida que o declive aumenta a instabilidade aumenta também.

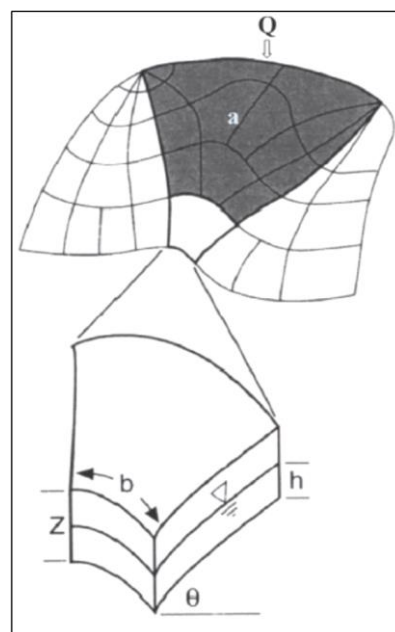
#### 4.1.2. Modelo Hidrológico

Na vertente hidrológica, este modelo fundamenta-se no modelo *TOPGOD* de O'Loughlin (1986) e no modelo *TOPMODEL* de Beven & Kirkby (1979). O modelo é baseado nos declives ( **$\theta$** ), nas áreas de contribuição ( **$a$** ) e na transmissividade do solo ( **$T$** ). Considera que a precipitação ( **$Q$** ) torna-se um fluxo sub-superficial constante, e, assim sendo, faz com que o modelo permita mapear o padrão espacial da condição de saturação de solo em equilíbrio (Índice de Humidade ( **$W$** )). (Montgomery & Dietrich, 1994). Para compreendermos a seguinte figura 28 é necessário compreender os parâmetros que a compõem, sendo assim: é necessário que o produto entre a área drenada a montante ( **$a$** ) e a precipitação ( **$Q$** ) que passa por um elemento de contorno de comprimento ( **$b$** ) seja maior que o produto da transmissividade ( **$T$** ) e o seno do ângulo da vertente ( **$\theta$** ) (Vieira, B., 2007 in Felizardo, 2016). Estes cálculos podem ser traduzidos na seguinte fórmula (Figura 26):

Equação 7

$$a \frac{Q}{b} \geq T \sin \theta$$

Figura 26 - Elementos topográficos do modelo hidrológico incorporado no SHALSTAB. Baseado no modelo TOPOG de O'Loughlin (1986). Extraído de Montgomery & Dietrich (1994).



Segundo O'Loughlin (1986), a condição de saturação (sem variação espacial), é definida pelo índice de humidade ( $W$ ). A seguinte fórmula é apresentada na equação 8. O índice de humidade ( $W$ ) engloba as relações  $Q/T$  e as relações  $a/b \sin \theta$ , correspondendo respetivamente ao controle hidrológico e topográfico. O modelo hidrológico pode ser ainda escrito em função da razão  $h/z$ , sendo considerado um fluxo de água inicial ( $q$ ), produto da velocidade ( $v$ ) pela área da seção transversal saturada ( $S$ ), conforme a equação 9. (Felizardo, 2016)



Equação 8

$$W = \frac{Q}{T} \cdot \frac{a}{b \sin \theta}$$

Equação 9

$$q = v \cdot S$$

Atendendo à Lei de Darcy, a velocidade do fluxo ( $v$ ), é o produto entre a condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) e o gradiente hidráulico ( $i$ ). É realizada uma aproximação para este último termo, considerando apenas a carga gravitacional/ elevação, inserido na variação do potencial total ( $\Delta H_{total}$ ). (Felizardo, B., 2016)

Equação 10

$$v = K_{sat} \cdot i$$

Equação 11

$$i = \left( \frac{\Delta H_{total}}{L} \right)$$

Sabendo que o gradiente hidráulico ( $i$ ), é a razão entre a diferença de potencial gravitacional entre dois pontos e o comprimento ( $L$ ),  $\sin \theta$ . Segundo a Lei de Darcy a equação pode ser reformulada substituindo  $i$  por  $\sin \theta$  e a velocidade do fluxo fica descrita pela seguinte equação.

Equação 12

$$v = K_{sat} \cdot \sin \theta$$

A área da secção transversal saturada ( $S$ ) é o produto entre a altura da coluna de água acima do plano de rutura ( $h$ ) e  $\cos \theta$  através da projeção vertical de  $h$  pode ser expressa na seguinte equação:

Equação 13

$$S = h \cdot \cos \theta$$

Vistas estas equações, e para finalizar, o fluxo de água pode ser expresso pela substituição das duas últimas equações por uma só, sendo ela:

Equação 14

$$q = K_{sat} \cdot \sin \theta \cdot h \cdot \cos \theta b$$

Montgomery & Dietrich (1994), dizem que a multiplicação da precipitação efetiva ( $Q$ ) pela área de contribuição ( $\alpha$ ) resultará na quantidade de escoamento (*runoff*) com um determinado comprimento ( $b$ ). Atendendo a este aspeto, é adicionado o comprimento  $b$  à equação. Assim, para o modelo hidrológico, o fluxo representa o produto da precipitação por unidade de tempo e área drenada a montante. Pode ser representada na seguinte equação:

Equação 15

$$Qa = K_{sat} \cdot \sin\theta \cdot h \cdot \cos\theta \cdot b$$

No que toca à transmissividade ( $T$ ), esta resulta do produto entre a condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) e da espessura do solo ( $e$ ). Sendo  $e$  igual a  $z \cos\theta$ , o parâmetro pode ser calculado com a seguinte equação 16. Verificando-se estes aspetos, o denominador hidrológico pode ser reescrito na seguinte equação 17:

Equação 16

$$T = K_{sat} \cdot z \cdot \cos\theta$$

Equação 17

$$T \cdot b \cdot \sin\theta = K_{sat} \cdot z \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot b$$

De acordo com o resultado final, e em função de  $h/z$  o modelo hidrológico, pode ser definido cosoante a seguinte equação:

Equação 18

$$\frac{h}{z} = \frac{Q}{T} \frac{a}{b \cdot \sin\theta}$$

#### 4.1.3. Combinação de modelos

Após a obtenção do modelo de estabilidade e do modelo hidrológico, procede-se à integração dos dados de modo a obter a modelação de base física do modelo SHALSTAB. A equação final deste modelo, é expressa pelo rácio hidrológico ( $Q/T$ ) e/ou rácio topográfico ( $a/b$ ). As seguintes equações representam os mesmos:

Equação 19

$$\frac{Q}{T} = \frac{ps}{pw} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \frac{b}{a} \sin\theta$$

Equação 20

$$\frac{a}{b} = \frac{ps}{pw} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \frac{T}{Q} \sin\theta$$

Combinando estas duas equações, obtém-se a fórmula referente à quantidade de precipitação crítica (Qc), ou por outras palavras, o fluxo de carga constante para a ocorrência de movimentos de vertente. Esta fórmula pode incluir, ou não, o parâmetro da coesão.

Equação 21 - Sem coesão

$$\frac{Q_c}{T} = \frac{\sin\theta}{a/b} \left[ \frac{p_s}{p_w} \left( 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) \right]$$

Equação 21 - Com coesão

$$\frac{Q_c}{T} = \frac{\sin\theta}{a/b} \left[ \frac{c'}{p_w g z \cos^2\theta \tan\phi} + \frac{p_s}{p_w} \left( 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) \right]$$

Após a combinação destes modelos, temos o resultado final que é o produto que se espera do SHALSTAB. Montgomery & Dietrich, (1994) **dizem** que a combinação de modelos reflete o funcionamento da ferramenta SHALSTAB, pois o cálculo da precipitação crítica de carga constante necessária à instabilidade reflete o potencial deslizamento naquela mesma área. Este potencial de deslizamento pode ser classificado com diferentes graus de estabilidade (Tabela 10, subcapítulo 4.3.4 - Metodologia de validação do modelo de suscetibilidade). Relativamente às classes de estabilidade estas podem variar entre, *Incondicionalmente instável* até à classe *Incondicionalmente estável*, com as classes intermédias classificadas de *instável* e *estável* (Figura 27 e Tabela 7). A classe *Incondicionalmente Instável* regista-se sempre quando o declive é maior que o ângulo de atrito ( $\tan\theta > \tan\phi$ ), mesmo com o solo seco ( $h/z=0$ ).

A classe *incondicionalmente estável* regista-se sempre quando a  $\tan\theta$  é menor ou igual a  $\tan\phi$  ( $\tan\theta < \tan\phi$ ), onde, com o solo saturado na mesma ( $h/z=1$ ).

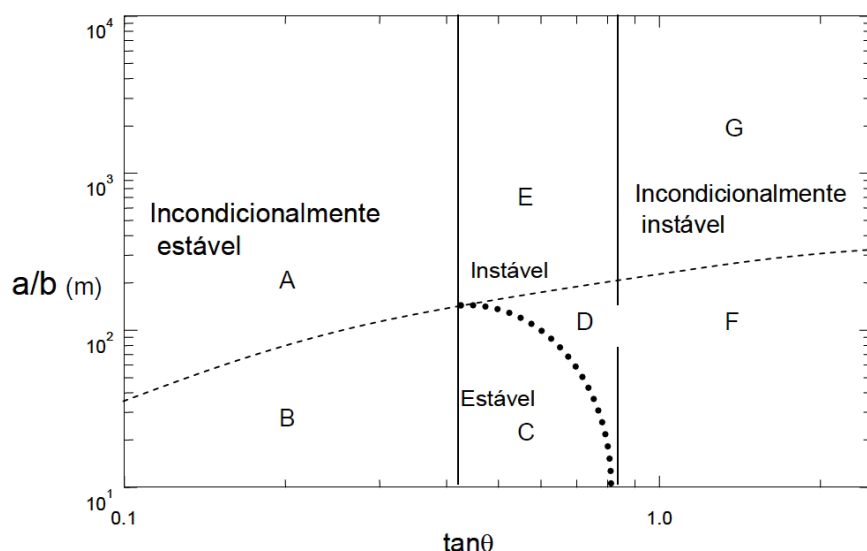


Figura 27 - Ilustração do gráfico representativo das classes de estabilidade atribuídas pelo SHALSTAB. A linha tracejada representa o limite de saturação. A variação de  $a/b$  é realizada de acordo com o declive ( $\tan\theta$ ). (A) – Incondicionalmente estável e saturado; (B) Incondicionalmente estável e não saturado; (C) – Estável e não saturado; (D) – Instável e não saturado; (E) – Instável e saturado; (F) – Incondicionalmente instável e não saturado; (G) – Incondicionalmente instável e saturado. Montgomery & Dietrich, 1994 in Vieira (2007).

Classes		Condição
Vertentes estáveis	A) Incondicionalmente Estável e Saturado "Incondicionalmente Estável"	$\tan\theta \leq \tan\Phi (1 - (p_s/p_w)); (a/b) > (T/Q) \text{ sen}\theta$
	B) Incondicionalmente Estável e não Saturado " > -2,2"	$\tan\theta \leq \tan\Phi (1 - (p_s/p_w)); (a/b) < (T/Q) \text{ sen}\theta$
	C) Estável e não Saturado "-2,5 - -2,2"	$(a/b) < (p_s/p_w) (1 - (\tan\theta/\tan\Phi)) (T/Q) \text{ sen}\theta$ $(a/b) < (T/Q) \text{ sen}\theta; \tan\Phi < \tan\theta < \tan\Phi (1 - (p_s/p_w))$
Vertentes instáveis	D) Instável e não Saturado "-2,8 - -2,5"	$(a/b) \geq (p_s/p_w) (1 - (\tan\theta/\tan\Phi)) (T/Q) \text{ sen}\theta$ $(a/b) < (T/Q) \text{ sen}\theta; \tan\Phi < \tan\theta < \tan\Phi (1 - (p_s/p_w))$
	E) Instável e Saturado "-3,1 - -2,8"	$(a/b) > (p_s/p_w) (1 - (\tan\theta/\tan\Phi)) (T/Q) \text{ sen}\theta$ $(a/b) > (T/Q) \text{ sen}\theta; \tan\Phi < \tan\theta < \tan\Phi (1 - (p_s/p_w))$
	F) Incondicionalmente Instável e não Saturado " < -3,1"	$\tan\theta > \tan\Phi; (a/b) < (T/Q) \text{ sen}\theta$
	G) Incondicionalmente Instável e Saturado "Incondicionalmente Instável"	$\tan\theta > \tan\Phi; (a/b) > (T/Q) \text{ sen}\theta$

Tabela 7 - Classes de estabilidade e respetiva saturação, obtidas através da combinação dos modelos (adaptado de Dietrich & Montgomery (1998) in Vieira (2012)).

#### 4.3.4. Procedimento de validação do modelo de suscetibilidade

Este trabalho pretende fazer uma análise comparativa entre diferentes resoluções de MDEs para a análise da suscetibilidade de movimentos de vertente. Atendendo a esta situação, as diversas metodologias de validação que se podem utilizar a partir da modelação matemática de base física (SHALSTAB) foram deixadas de parte.

Determinou-se a utilização de um único método de validação dos resultados obtidos a partir dos modelos de instabilidade gerados, sendo este método conhecido como *tabelas de contingência*, ou *matriz de confusão* (Kohavi & Provost, 1998).

		Suscetibilidade (predição)				
		S - Sim	N - Não			
Deslizamentos (Inventário)	Instável	VP	FP	Positivos	VP - Verdadeiro Positivo	FP - Falso Positivo
	Estável	FN	VN	Negativos	FN - Falso Negativo	VN - Verdadeiro Negativo
		Instabilizada	Não estabilizada			

Tabela 8 - Tabela de contingência. (adaptado de Kohavi & Provost, 1998).

VPR - Rácio de Verdadeiros Positivos	$RVP = \frac{VP}{VP+FN}$	Indicam a percentagem de deslizamentos corretamente previstos
RFP - Rácio de Falsos Positivos	$RFP = \frac{FP}{FP+VN}$	Indica área prevista como instável mas não deslizada no total da área incorretamente classificada como instável mais a estável
ACC - Acurácia (Fiabilidade)	$ACC = \frac{VP+VN}{S+N}$	Indica a área da suscetibilidade bem classificada relativamente à área total
PPV - Precisão	$PPV = \frac{VP}{VP+FP}$	Indica a capacidade preditiva das áreas classificadas como instáveis (potencial de deslizamento)
F1 - Medição	$2 \left( \frac{RVP \cdot PPV}{RVP+PPV} \right)$	Média ponderada da precisão pelo verdadeiro positivo. Varia de 0 a 1 sendo o melhor valor de 1. Indica se, podendo ter uma área instável reduzida, é suficiente para classificar corretamente os deslizamentos inventariados.

Tabela 9 - Método de elaboração das tabelas de contingência/matriz de confusão. Matriz das tabelas e seus acrónimos. (adaptado de Kohavi & Provost, 1998)

A metodologia de validação, neste caso, a *matriz de confusão* de Kohavi & Provost (1998), foi adaptada ao seguinte trabalho de modo a analisar os resultados obtidos através do método matemático de base física o SHALSTAB. Tendo em conta a tabela 8, podem ser obtidas 4 classes de resultados possíveis: Verdadeiros Positivos/*True Positive* (VP/TP); Falsos Positivos/*False Positive* (FP/FP); Verdadeiros Negativos/*True Negative* (VN/TN); Falsos Negativos/*False Negative* (FN/FN).

**Os Verdadeiros Positivos/*True Positive* (VP/TP)** são de facto os deslizamentos de ocorrem e foram contabilizados como suscetível.

**Os Falsos Positivos/*False Positive* (FP/FP)** aqueles que são contabilizados como positivos, ou seja, são suscetíveis, no entanto não ocorreram movimentos de vertente.

**Os Verdadeiros Negativos/*True Negative* (VN/TN)** são aqueles que foram contabilizados como negativos, e se são mesmo, não são suscetíveis, ou seja, não foram registados ocorrências de movimentos de vertente.

**Os Falsos Negativos/False Negative (FN/FN)** são aqueles que foram contabilizados como negativos, e não são suscetíveis, no entanto foram registadas ocorrências de movimentos de vertente

Foram calculados certos índices (Tabela 9) de modo a diagnosticar a área de estudo em questão (Quinta das Carvalhas) tendo em conta o inventário realizado anteriormente por Faria, (2014).

- **TPR (“True positive rate” – rácio de verdadeiros positivos (RVP)).** Este índice de diagnóstico representa o número de deslizamentos que foram corretamente previstos em áreas, onde as classes representam grau de suscetibilidade. Esta taxa é calculada da seguinte maneira: o valor dos deslizamentos corretamente previstos (TP) é dividido pelo número total de ocorrências (P), ou seja,  $(TP/P)$ ;
- **FPR (“false positive rate” – rácio de falsos positivos (RFP)).** Este índice reflete as áreas classificadas como instáveis (que são representadas pelas classes de maior suscetibilidade) mas onde não foram registadas ocorrências.  $(FP \text{ (Falsos Positivos)} / N \text{ (não ocorrências)})$ ;
- **ACC (acurácia ou fiabilidade).** Este índice indica a área de suscetibilidade bem classificada nomeadamente à área total. Sendo assim o número de ocorrências é dividido pela área total de análise. Este cálculo é expresso na seguinte equação:  $TP+TN/P+N$ , onde TP são os Verdadeiros Positivos, TN são os Verdadeiros Negativos, P representa os deslizamentos previstos e N representa as não ocorrências;
- **PPV (precisão).** Este item indica a capacidade de previsão das áreas classificadas como instáveis (áreas de potencial deslizamentos). É expressa na seguinte equação:  $TP/TP+FP$

De modo a facilitar a leitura destes índices, revela-se que, quanto maior for o valor resultante, melhor é o modelo e mais positivo este se demonstra na validação e previsão dos seus resultados. O FPR é o contrário, sendo que um valor inferior representa melhores resultados.

## CAPÍTULO 3 - PROCESSAMENTO DOS DADOS E METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

### 1. Fotografias aéreas

NA quinta do Bomfim, os voos foram realizados pela empresa Spin.works a uma altitude compreendida de 120m com o intuito de realizar modelos digitais de elevação com resolução de 10cm.

No que toca à quinta das Carvalhas foram realizados vários voos operados por duas companhias distintas, sendo elas a Spin.Works e a Municipia, não estando esta quinta envolvida no projeto de investigação CLOUDMAPPER. Relativamente ao voo operado pela Spin.Works, este foi realizado a 100m de altitude com a finalidade de construção de Modelos Digitais de Elevação com espaçamento de 20cm.

Os voos operados pela empresa Municipia foram realizados a 5000m de altitude, produzindo modelos digitais de elevação com resolução de 50cm de equidistância.

### 2. Fluxograma de trabalho

A principal permissa deste trabalho é o estudo da instabilidade de vertentes, tendo sendo definidas duas áreas de estudo. Na quinta do Bomfim não houve possibilidade de se proceder à simulação da suscetibilidade, devido à falta de dados para tal. Optou-se então pela comparação de MDE's de diferentes resoluções criados a partir de um MDE de base (MDE de 0,20m serviu de base para as restantes resoluções) de modo a verificar diferenças altimétricas entre modelos originais e modelos manipulados.

Relativamente à quinta das Carvalhas, os dados necessários para a simulação da instabilidade de vertentes (inventário de deslizamentos, parâmetros e experiências no terreno) foram obtidos em sede de projetos já realizados neste âmbito. Após a obtenção destes dados procedeu-se ao tratamento dos parâmetros físicos, topográficos e hidrológicos de maneira a que o *software* SAGA GIS execute a ferramenta SHALSTAB para a simulação.

Verificados estes passos, obteve-se 7 cenários diferentes provenientes do *software*, com resoluções espaciais distintas. Os dados foram validados com recurso à “matriz de confusão”/Tabelas de contigência, de modo a serem alvo de comparação entre eles, para verificar qual cenário melhor se ajusta na modelação de suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente (Tabela 10).

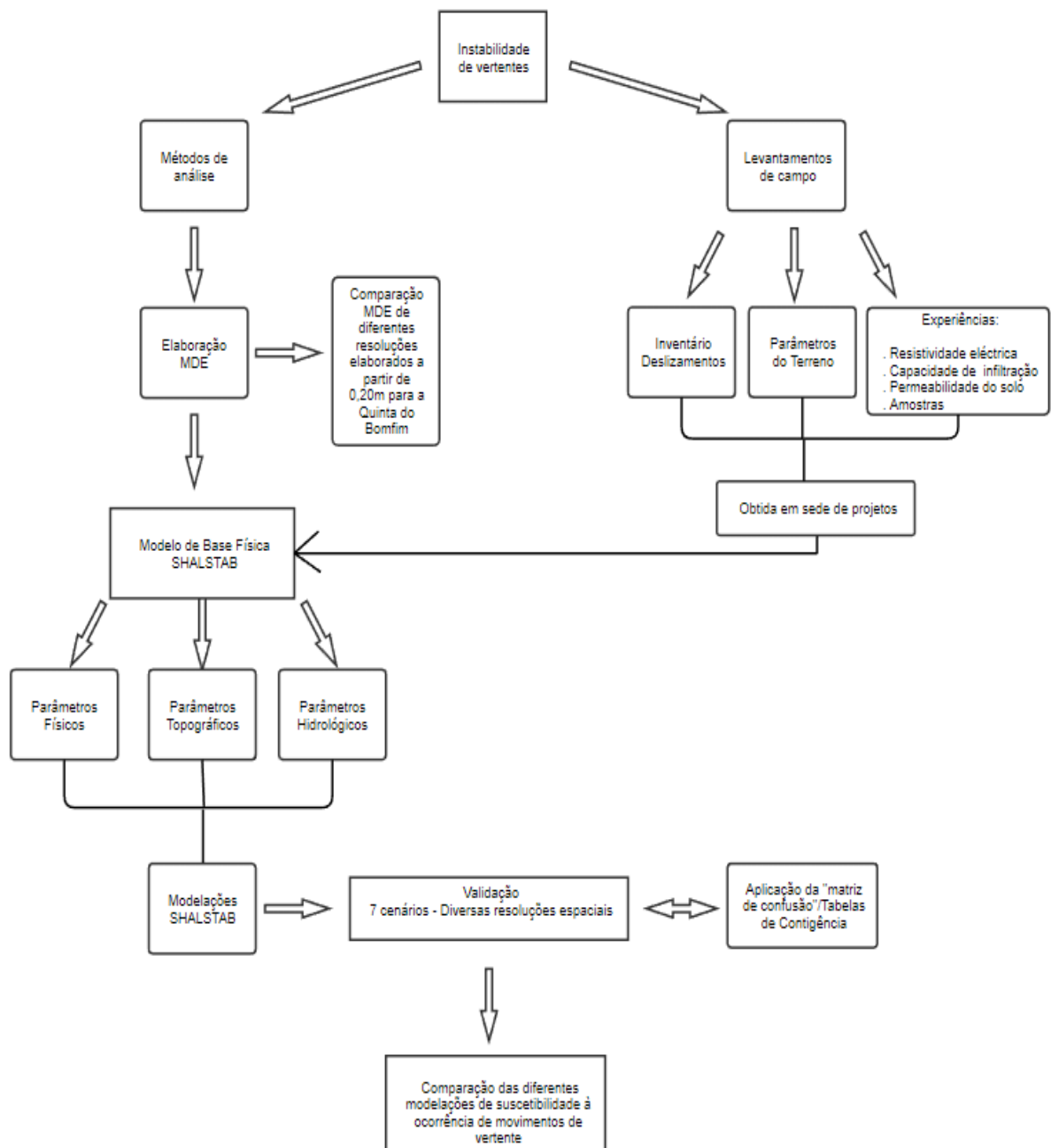


Tabela 10 - Fluxo de trabalho.



### 3. Obtenção de dados para metodologia

A obtenção das fotografias aéreas (como já descrito anteriormente) foi o primeiro passo de uma etapa que contempla a previsão da suscetibilidade de ocorrência de movimentos de vertente.

Para a Quinta do Bomfim os dados utilizados foram facultados por parte do **docente**, com o objetivo de comparação de diversos modelos digitais de elevação provenientes de um MDE base.

Os dados utilizados para a modelação matemática de base física (SHALSTAB), na Quinta das Carvalhas, foram conseguidos através de bibliografia científica já existente, como é o caso de Faria, A., (2014) e através de trabalho de laboratório.

### 4. Modelos Digitais de Elevação da Quinta do Bomfim

A criação dos MDE's originais para a Quinta do Bomfim, foi elaborada a partir da interpolação dos pontos e das curvas de nível fornecidas, derivadas das imagens aéreas. De seguida procedeu-se à “**generalização**” dos seguintes MDE's: 0,40m, 1m, 2m e 5m com base no MDE de 0,20m elaborado a partir dos pontos e curvas de nível. A transformação dos MDE's a partir do MDE de base foi realizada com base nos aspetos acima descritos, mais propriamente através das curvas de nível, não sendo necessário o uso de interpolações.

Estes modelos foram construídos com base em fotografia área mais detalhada, de 10cm produzida pela Spin.works.

O objetivo deste procedimento é verificar as diferenças do MDE's originais, comparando-os com os MDE's “generalizados”. Com recurso à ferramenta *Raster calculator* do *ArcMap*, subtraíram-se os MDE original – MDE generalizado.

Foram atribuídas três classes altimétricas, cujos valores são: (-0,1), (0-0,1) e (>1), de modo a verificar onde se encontram os valores negativos, estabilizados e valores positivos.

Estas classes permitem uma melhor leitura, identificação e compreensão entre as diferenças de altitude. Os valores inferiores a (-0,1) significam que o MDE original apresenta valores negativos abaixo de mais de 10cm em relação ao MDE manipulado, ou seja, o MDE original recorta vertentes em relação ao MDE generalizado. A classe (0-0,1) significa que não houve muita alteração de um MDE para outro, oscilando o MDE original entre a 0 a 10cm em relação ao manipulado. A última classe (>1) significa que o MDE original apresenta valores positivos acima de 10cm em relação ao MDE\_generalizado na representação da realidade.

Atendendo a estas atribuições e processos acima descritos, o último passo foi uma reclassificação dos MDE's utilizando a ferramenta *Reclassify* do *software ArcMap*. Concluída esta etapa, a seguinte passou por determinar a área dos MDE's e a percentagem da mesma.

De modo a saber a percentagem de área que cada classe altimétrica ocupa no MDE, efetuou-se uma regra de três simples. Como já temos a área, vamos buscar o valor total da área de cada MDE e aplicamos a seguinte fórmula:

Equação 23

$$x = \frac{\text{Área} \times 100}{\text{Número total de píxeis}}$$

Após a elaboração destes passos, com recurso ao MDE da Quinta do Bomfim e com a ajuda de um mapa de declives (utilização da ferramenta *slope*) de cada MDE, torna-se mais fácil analisar os diferentes resultados, resultantes das subtrações dos MDE's originais – MDE degradados. Na seguinte tabela, estão os resultados após uma reclassificação, com o intuito de saber a quantidade área ocupada em cada classe elaborando as suas percentagens (Tabela 11).

Bonfim_spinworks					
Resolução: 10cm	0,2m	0,4m	1m	2m	5m
MDE_pontos	Max: 512,749 Min: 76,8775	Max: 512,707 Min: 76,9163	Max: 512,444 Min: 76,9415	Max: 512,637 Min: 77,3796	Max: 512,436 Min: 77,4261
Nº píxeis (Total)		5 980 191	956 483	239 562	38 261
Tiff (generalizado do 0,2m)		Max: 512,749 Min: 76,8912	Max: 512,67 Min: 76,8912	Max: 512,643 Min: 77,265	Max: 512,239 Min: 78,3803
Nº píxeis (Total)		5 981 686	957 981	240 253	98 483
RC ( <i>raster calculator</i> ) (MDE pontos – MDE generalizado) amplitude das classes		Max: 10,36 Min: -9,89	Max: 13,69 Min: -15,29	Max: 14,87 Min: -13,79	Max: 15,34 Min: -15,88
Diferenças	(MDE pontos – MDE generalizado) – reclassificados				
Nº píxeis (Total)		5 980 191	956 482	239 562	38 261
Nº píxeis (por Classe)					
- Classe 1 (<-0,1)		- 487 686	- 238 673	- 102 284	- 14 365
- Classe 2 (-0,1 - 0,1)		- 4 736 608	- 338 723	- 70 343	- 4 912
- Classe 3 (> 0,1)		- 755 897	- 379 086	- 66 935	- 18 984
Área		956 830,56	956 482	958 248	956 525
Percentagem (%)					
- Classe 1		- 8%	- 25%	- 43%	- 38%
- Classe 2		- 79%	- 35%	- 29%	- 13%
- Classe 3		- 13%	- 40%	- 28%	- 50%

Tabela 11 - Modelos Digitais de Elevação da Quinta do Bomfim elaborados a partir do MDE 0,20m.

Após a subtração do MDE pontos – MDE generalizado, apenas uma resolução perdeu área, neste caso o MDE de 1m de resolução. Por outro lado, os restantes MDE's provenientes deste cálculo acabaram por manter a mesma área em relação do modelo original.

A resolução de 0,40m é a única que apresenta maior regularidade em relação as demais, pois 79% dos pixels situam-se na classe (-0,1 - 0,1). Isto demonstra que mesmo havendo oscilações na representação da realidade a diferença será quase nula, variando entre 0 a 10cm de diferença, devido a ser um modelo com grande proximidade com o MDE de 0,20m de resolução espacial. Atendendo à amplitude das classes atribuídas, o MDE proveniente do *raster calculator* regista valor mínimo de -9,89 e valor máximo de 10,36.

Analisando o MDE de 1m proveniente da subtração entre MDE original e o generalizado, e após a atribuição das três classes: (<0,1), (0-0,1) e (>1), o valor negativo mais baixo é - 15,29 e o mais alto 13,69, revelando que 40% da área do MDE está representada pela classe (>0,1). Ou seja, este valor revela que o **MDE original tem mais propensão a generalizar** em relação ao MDE generalizado (**MDE de 1m produzido a partir de um MDE 0,20m e não a partir dos pontos**).

Na representação do modelo, através de uma comparação entre o ortofotomapa, mapa de declives e os resultados do *Raster calculator* (REC\_generalizado), verifica-se que as áreas florestais têm grande influência na generalização do MDE, assim como a presença de equipamentos e a própria armação da vinha. A disposição dos terraços agrícolas varia consoante o declive. Os valores negativos surgem ao longo dos terraços agrícolas e os valores positivos costumam situar-se nas vertentes entre os terraços agrícolas.

Quando o declive é mais acentuado o MDE original tem tendência a revelar maior altitude do que o MDE manipulado, quando o declive é menos acentuado o MDE original tem tendência em cortar altitude do MDE manipulado.

Verifica-se aqui que os declives assumem importância na análise de um MDE. No que toca a caminhos/troços há uma relativa tendência para uma estabilidade, não há muita subida nem descida na altitude, mantendo-se na classe (0-0,1).

Na resolução de 2m, a classe com mais destaque é a classe (<-0,1) com 43%, sendo a mais representativa. Ao contrário dos anteriores MDE's que têm tendência de aumentar consoante a escala, neste modelo verifica-se uma redução.

À medida que aumenta para 5m verifica-se, de novo, um aumento de percentagem nesta classe. Esta classe (<-0,1), com base nos resultados do *raster calculator*, é a dos valores

negativos, chegando-se à conclusão que há uma tendência para a simplificação da realidade. Isto quer dizer que o plano do MDE original recorta o plano da vertente em comparação com o MDE modificado. Atendendo à amplitude das classes atribuídas, o MDE de 2m proveniente do cálculo da ferramenta *raster calculator*, apresenta valor mínimo de -13,79 e um valor máximo de 14,87.

Na escala de 5m, destaca-se o valor mais alto de 50% na classe ( $>0,1$ ). Este valor é o mais alto em todas as resoluções. Atendendo à amplitude das classes atribuídas, o MDE de 5m de resolução resultante do cálculo do *raster calculator*, apresenta valor mínimo de -15,88 e um valor máximo de 15,34.

Os valores referentes à amplitude das classes atribuídas, nomeadamente o valor máximo e mínimo, representam até que ponto os valores positivos e negativos têm o seu alcance, isto é, até que valor (positivo e negativo) atinge o valor máximo e mínimo provenientes do cálculo da ferramenta *raster calculator*.

Reclassificação	Declives MDE 1m	Classes		
		( $<-0,1$ )	( $-0,1 - 0,1$ )	( $>0,1$ )
1	0-5	13482	44212	11735
2	5-10	24313	73761	28021
3	10-15	24295	60421	37249
4	15-20	22378	43836	37865
5	20-25	21795	32113	36168
6	25-30	22260	23333	36979
7	30-83,37474823	110150	61047	191069

Tabela 12 - Reclassificação dos declives do MDE de 1m de resolução, com base nas classes atribuídas.

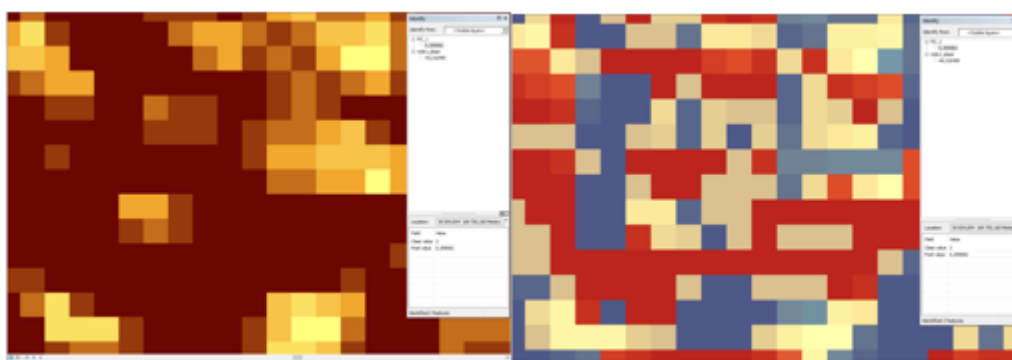


Figura 28 - Sobreposição dos declives com as classes atribuídas.

Como já referido acima, a utilização da ferramenta *slope* permitiu a obtenção de um mapa de declives com o intuito de facilitar a análise dos MDE's. Tendo como o exemplo o MDE de 1m, a generalização do modelo a partir de o de 0,20m para 1m apenas **perde um pixel**.

Com a utilização da ferramenta *Tabulate Area (Spatial Analyst)* do ArcMap cruzamos duas variáveis: os declives com as classes altimétricas atribuídas (<0,1), (-0,1 - 0,1) e (> 0,1).

Ao cruzar estas duas variáveis podemos obter resultados interessantes, destacando-se a percentagem das 7 classes atribuídas no mapa de declives, a distribuição dos pixéis pelas respectivas classes do mapa de declives, a repartição da percentagem das classes (<0,1), (0-0,1) e (>1) consoante as classes do mapa de declives, sendo este último cruzamento de dados o que mais importância tem pois permite uma análise detalhada.

Observando a tabela 12, verifica-se a distribuição dos pixéis pelas classes atribuídas, cruzando os respetivos dados com as classes de declives. Os números visíveis são a quantidade de pixéis repartidos pelas respetivas classes, concluindo-se que uma só classe de declives pode ser representada por 3 classes, ou seja, na mesma classe é possível verificar que surgem valores que **dão mais altitude**, **outros estabilizados** (sem muitas alterações) e **outros que retiram elevação** em relação ao modelo original (Figura 28).

## 5. Processamento dos MDE's da Quinta das Carvalhas

### 5.1. Fatores topográficos

#### 5.1.1 Declividade da Quinta das Carvalhas

O declive é um fator topográfico de extrema importância para a ocorrência de movimentos de vertente, devido à influência que exerce na ação nas forças tangenciais dos modelos de estabilidade (Teixeira, 2012).

Os mapas de declives foram obtidos através da ferramenta *Slope*, inserida no *software ArcMap (Spatial Analyst)*. Estas construções cartográficas foram classificadas em 7 classes apresentadas em graus, sendo elas: <5°; 5 – 10°; 10 – 15°; 15 – 20°; 20 – 25°; 25 – 30° e >30° como visível nas figuras 29, 30 e 31.

**Primeiramente serão apresentados os mapas de declives provenientes do voo da empresa Spin.works e após isso os mapas resultantes dos voos da empresa Municipia, sendo estes os MDE's originais (Tabela 13 e 14).**

Quinta das Carvalhas_Spin.works	Declives			
	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
MDE 0,20m	0°	90°	30°	20°
MDE 0,40m	0°	87°	25°	15°
MDE 1m	0°	81°	25°	13°
MDE 2m	0°	74°	26°	11°
MDE 5m	0°	53°	25°	9°

Tabela 13 - Declives dos voos operados pela Spin.works.

Quinta das Carvalhas_Municipia	Declives			
	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
<b>MDE 1m</b>	0°	77°	27°	12°
<b>MDE 5m</b>	0°	55°	26°	9°

*Tabela 14 - Declives dos voos operados pela Municipia.*

Analisaremos agora a representatividade de classes por parte dos 7 modelos digitais. O modelo espacial de 0,20m de resolução demonstra maior representação nas áreas com declives superiores a 30° (>30°). Esta classe ocupa 8,5 ha com 39% da área experimental (ver tabela da figura 31). Em sentido inverso as classes com menos representação são as 5 – 10° e 10 – 15° ocupando 9% (1,95ha) e 8% (1,81ha) respetivamente. (Figura 29)

O mapa de declives com resolução de 0,40m é muito semelhante (como já referido anteriormente) ao de 0,20m de resolução. Aqui as classes predominantes são exatamente as mesmas, no entanto com valores diferentes. A classe mais representativa é a classe superior a 30°, com 38% (8,5ha). As classes menos representativas são as 5 – 10° e 10 – 15°, ocupando 9% (1,9ha) e 8% (1,8ha). A expressão significativa desta classe comparando as demais mostra a importância do detalhe na resolução, ou seja, representa a morfologia dos terraços agrícolas da área em questão. A forte declividade pela construção dos patamares para o uso da plantação vinícola, é mais evidente nestes dois primeiros modelos (0,20m e 0,40m de resolução) devido ao forte detalhe apresentado. O detalhe dos terraços pode ser considerado proporcional à resolução dos modelos gerados. (Figura 29)

O mapa de declives com 1m de resolução tem maior representatividade na classe superior a 30° (>30°) com 37%, ou seja, 8ha da área experimental. As classes com menos representatividade são as <5° e 5 – 10° com 6% (1,3ha) e 9% (1,9ha) respetivamente. (figura 29)

O mapa de declives com 2m de resolução apresenta mais representatividade na classe superior a 30° (>30°) com 34%, ocupando 7,5ha da área em questão. As classes mais baixas são as mesmas que o modelo de 1m, sendo elas <5° e 5 – 10°, com 4% (0,8ha) e 5% (1,2ha). (Figura 30)

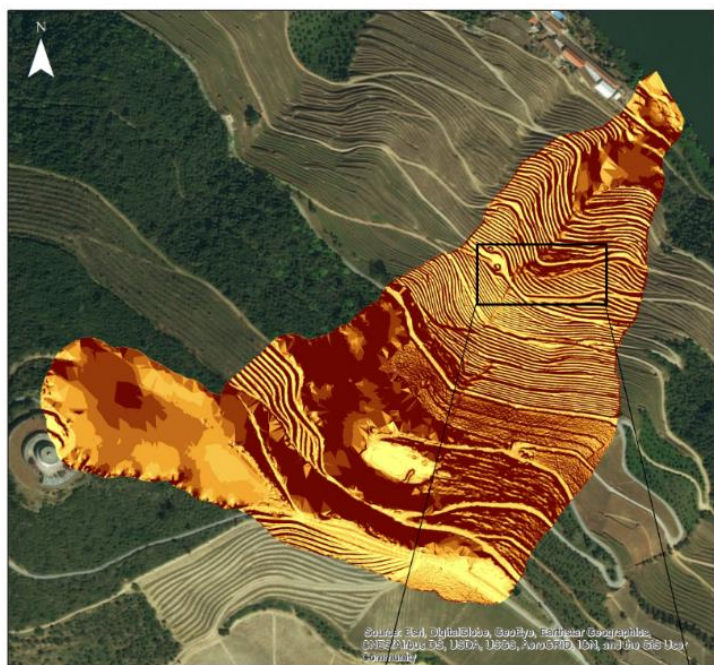
O mapa de declives de 5m, apresenta maior representação, de novo, na classe superior a 30° (>30°) com 32%, com 7,1ha. As classes menos representativas (as mesmas que os modelos de 1m e 2m de resolução) são as <5° e 5 – 10° com 3% (0,7ha) e 4% (0,8ha) respetivamente. (Figura 30)

No que toca aos modelos da Municipia, o mapa de declives com 1m de resolução tem maior representatividade na classe superior a 30° (>30°) com 40% e 8,8ha. As classes com menor representação são as <5° e 5 – 10° com 3% (0,6ha) e 6% (1,4ha). (Figura 31)

No modelo de 5m, a classe com mais representação é a superior a 30° (>30°) com 35%, ocupando 7,8ha. As menos representativas são as classes <5° e 5 – 10°, com 2% (0,5ha) e 5% (1,1ha). (Figura 31)

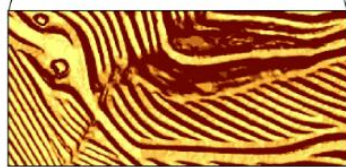
Os modelos com menor resolução (resolução de 0,20m e 0,40m), a nível visual são mais detalhados. Pelo contrário, os modelos com maior resolução (1m, 2m e 5m de resolução) oferecem menos detalhe, pois um pixel pode aglomerar 2 deslizamentos e identificar só como 1 devido ao espaçamento do pixel.



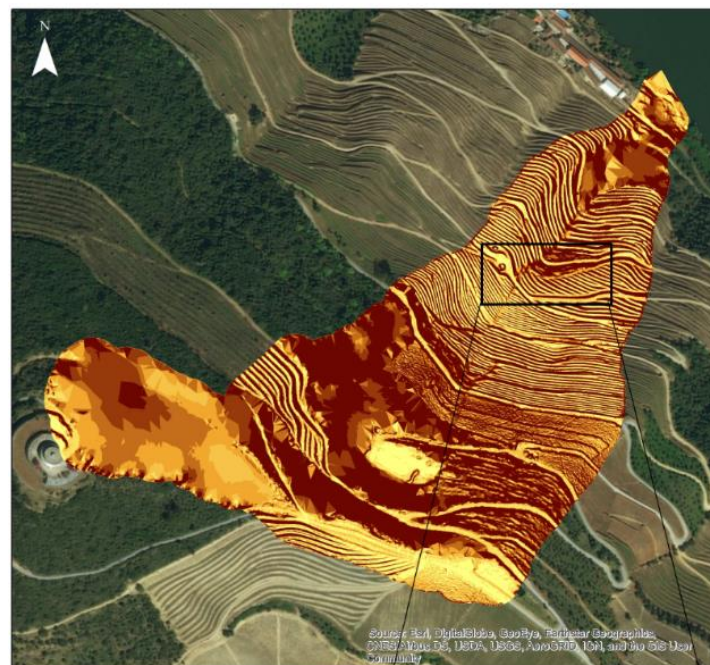


0.4 0.2 0 Km

MDE 0,20m_Spinworks		
Declives	Área (ha)	Percentagem (%)
<5	2,4	11
5-10	1,9	9
10-15	1,8	8
15-20	2,2	10
20-25	2,4	11
25-30	2,8	13
30-35	8,5	39

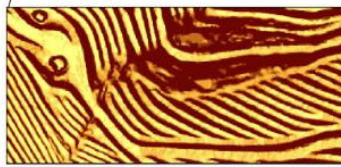


Projeção: ETRS\_1989\_Transverse\_Mercator

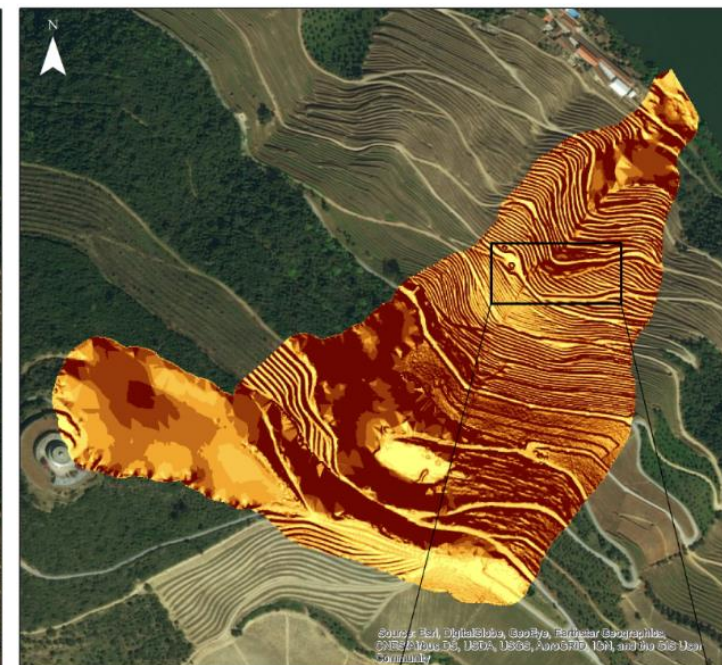


0.4 0.2 0 Km

MDE 0,40m_Spinworks		
Declives	Área (ha)	Percentagem (%)
<5	2,2	10
5-10	2,0	9
10-15	1,8	8
15-20	2,3	10
20-25	2,5	11
25-30	2,9	13
30-35	8,5	38

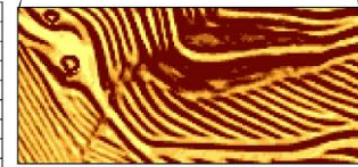


Projeção: ETRS\_1989\_Transverse\_Mercator



0.4 0.2 0 Km

MDE 1m_Spinworks		
Declives	Área (ha)	Percentagem (%)
<5	1,3	6
5-10	1,9	9
10-15	2,0	9
15-20	2,5	11
20-25	2,9	13
25-30	3,3	15
30-35	8,2	37



Projeção: ETRS\_1989\_Transverse\_Mercator

Figura 29 - Declives MDE 0,20m; MDE 0,40m e MDE 1m da Quinta das Carvalhas



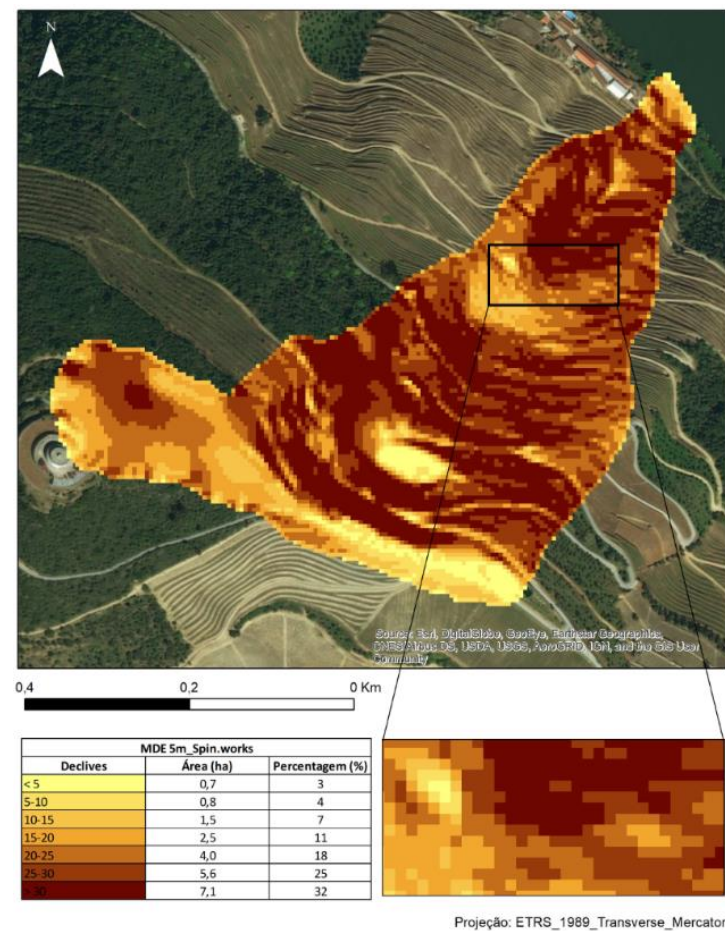
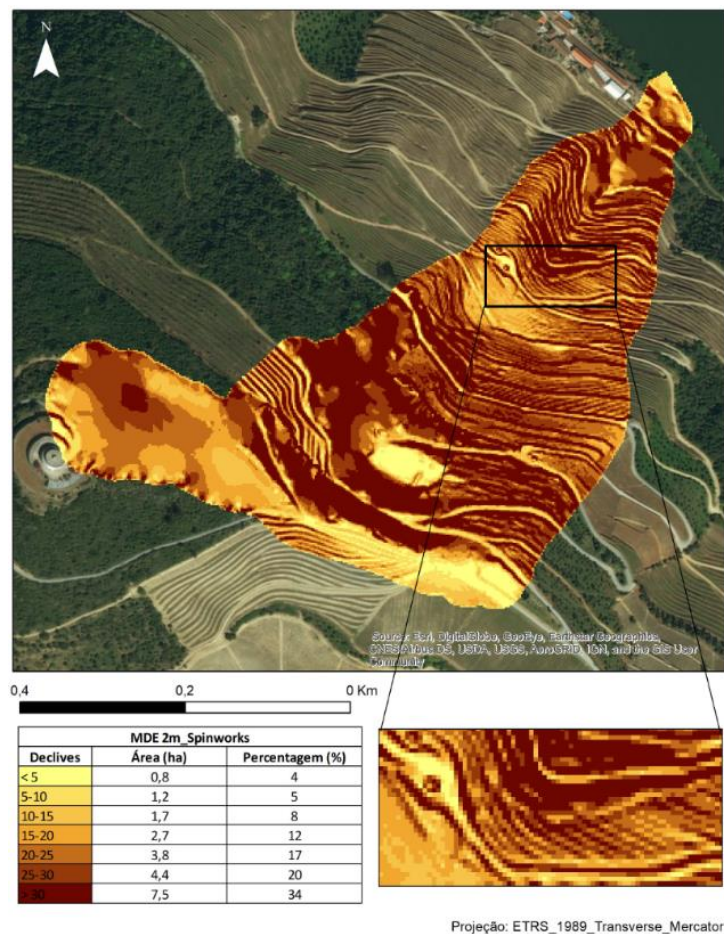


Figura 30 – Declives MDE de 2m e MDE de 5m.

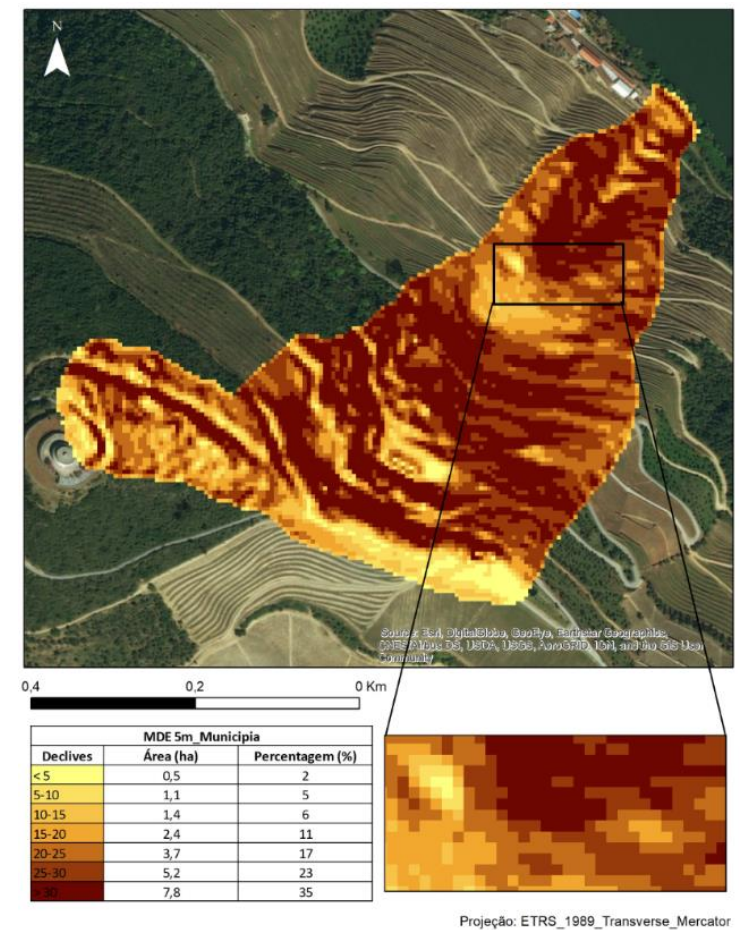
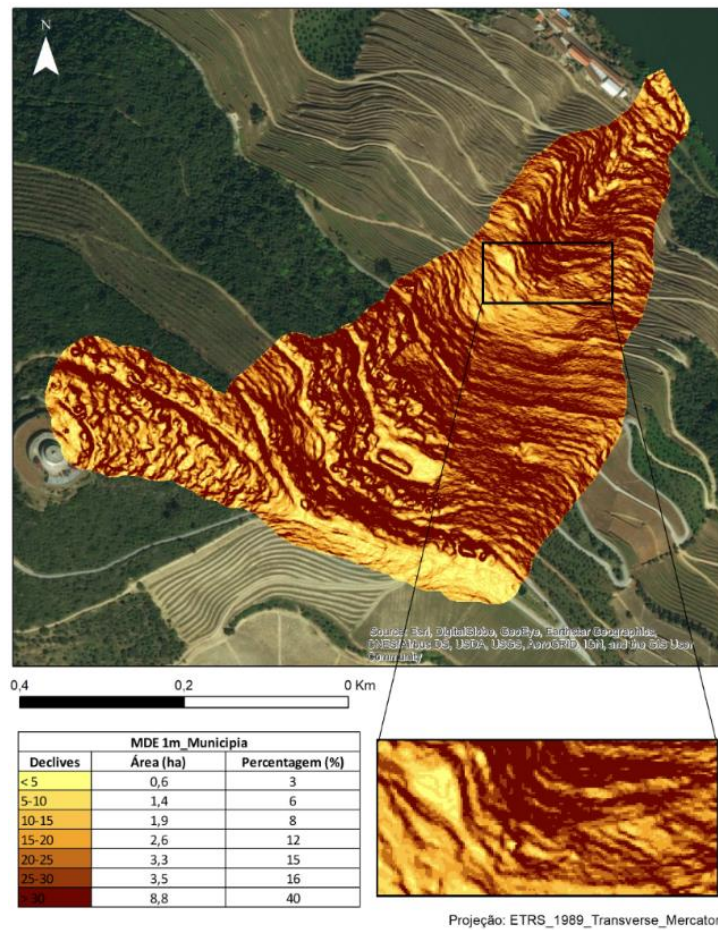


Figura 31 - Declives MDE de 1m e MDE de 5m provenientes da Municipia.



5.1.2. Áreas contributivas da Quinta das Carvalhas

De modo a compreender as diferenças, de uma maneira quantitativa, procedeu-se à realização de uma tabela de modo a clarificar as divergências estatísticas dos diversos algoritmos, D8, D $\infty$  e MFD na modelação hidrológicas de diferentes resoluções. Esta análise quantitativa é complementada com uma análise qualitativa que advém da leitura dos diferentes resultados visuais que os mapas transmitem, descrita em tabela.

A figura 32, demonstra a bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas, com recurso a um ortofotomapa, tendo os pixéis uma equidistância de 1m entre si. Ao observar esta imagem, consegue-se perceber a forma de atuação de cada algoritmo, nomeadamente o D8, D $\infty$  e o MFD.

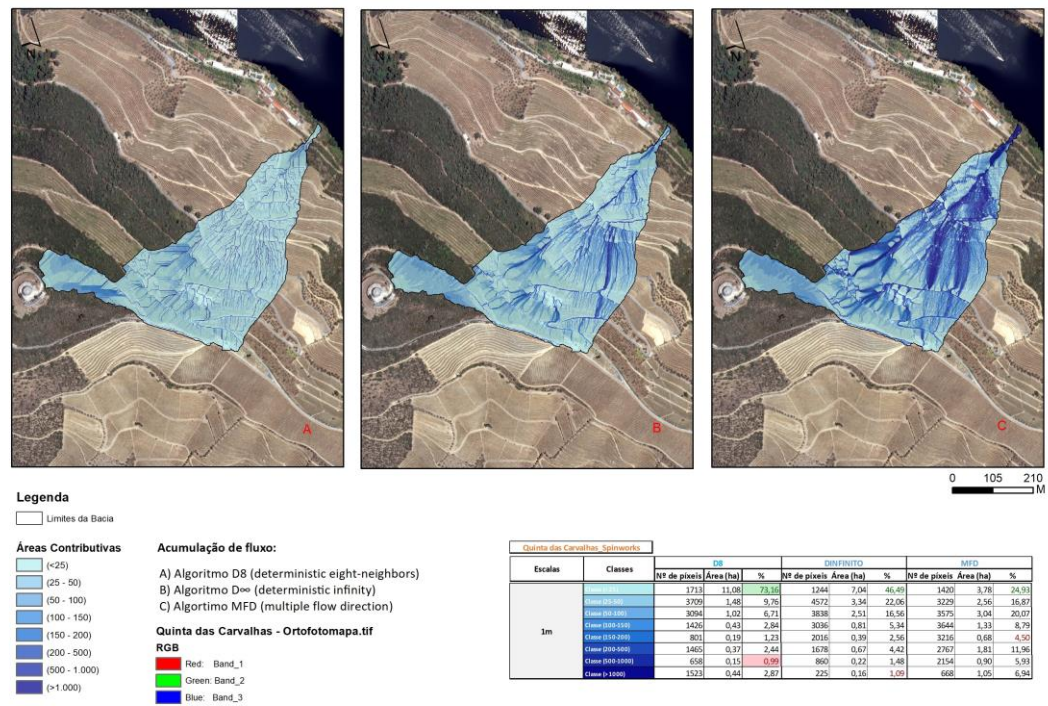


Figura 32 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; D $\infty$  ;MFD). MDE de 1m de resolução.

Serão elaborados dois 2 tipos análise para interpretação da tabela, sendo uma à escala e outra aos algoritmos (Tabela 15 e 16).

Quinta das Carvalhas, Spinworks										
Escala	Classes	D8			DINFINITO			MFD		
		Nº de píxeis	Área (ha)	%	Nº de píxeis	Área (ha)	%	Nº de píxeis	Área (ha)	%
0,20m	Classe (< 25)	2267	14,55	96,02	394	14,55	96,05	2944	12,67	83,67
	Classe (25-50)	15741	0,23	1,51	16153	0,35	2,31	27669	0,84	5,54
	Classe (50-100)	9992	0,11	0,71	9352	0,14	0,90	22162	0,60	3,99
	Classe (100-150)	4736	0,05	0,31	4924	0,04	0,27	18087	0,24	1,61
	Classe (150-200)	3022	0,03	0,20	3011	0,02	0,13	14436	0,14	0,90
	Classe (200-500)	6484	0,07	0,48	2530	0,03	0,23	11079	0,31	2,05
	Classe (500-1000)	3294	0,03	0,19	952	0,01	0,08	7000	0,15	0,99
0,40m	Classe (> 1000)	8193	0,09	0,57	296	0,01	0,04	1927	0,19	1,23
	Classe (< 25)	2149	13,72	90,56	764	13,26	87,54	2438	9,91	65,42
	Classe (25-50)	9353	0,57	3,76	11276	1,07	7,07	14089	1,99	13,14
	Classe (50-100)	5717	0,31	2,03	7189	0,47	3,10	12050	1,14	7,50
	Classe (100-150)	2776	0,11	0,72	3772	0,12	0,82	10218	0,53	3,50
	Classe (150-200)	1781	0,06	0,40	2367	0,06	0,39	7985	0,29	1,90
	Classe (200-500)	3333	0,14	0,93	2102	0,11	0,73	6533	0,63	4,17
1m	Classe (500-1000)	2044	0,07	0,46	841	0,03	0,23	4561	0,29	1,89
	Classe (> 1000)	3886	0,17	1,14	257	0,02	0,12	1258	0,38	2,48
	Classe (< 25)	1713	11,08	73,16	1244	7,04	46,49	1420	3,78	24,93
	Classe (25-50)	3709	1,48	9,76	4572	3,34	22,06	3229	2,56	16,87
	Classe (50-100)	3094	1,02	6,71	3838	2,51	16,56	3575	3,04	20,07
	Classe (100-150)	1426	0,43	2,84	3036	0,81	5,34	3644	1,33	8,79
	Classe (150-200)	801	0,19	1,23	2016	0,39	2,56	3216	0,68	4,50
2m	Classe (200-500)	1465	0,37	2,44	1678	0,67	4,42	2767	1,81	11,96
	Classe (500-1000)	658	0,15	0,99	860	0,22	1,48	2154	0,90	5,93
	Classe (> 1000)	1523	0,44	2,87	225	0,16	1,09	668	1,05	6,94
	Classe (< 25)	1656	7,29	48,17	374	1,97	13,01	297	1,14	7,53
	Classe (25-50)	1672	2,07	13,69	833	1,78	11,73	511	0,97	6,41
	Classe (50-100)	1441	2,05	13,51	1099	3,35	22,10	758	2,07	13,65
	Classe (100-150)	807	0,80	5,25	1344	2,00	13,21	900	2,05	13,52
5m	Classe (150-200)	555	0,50	3,32	1240	1,22	8,07	993	1,35	8,91
	Classe (200-500)	1027	1,13	7,46	987	2,79	18,42	941	3,30	21,80
	Classe (500-1000)	432	0,41	2,73	757	0,99	6,51	960	1,63	10,78
	Classe (> 1000)	791	0,89	5,86	194	1,05	6,96	235	2,63	17,40
	Classe (< 25)	637	2,62	17,32	30	0,12	0,81	15	0,04	0,24
	Classe (25-50)	509	1,62	10,67	41	0,29	1,93	35	0,29	1,94
	Classe (50-100)	418	2,03	13,40	77	0,72	4,79	53	0,37	2,46
	Classe (100-150)	303	1,34	8,88	155	0,97	6,40	79	0,55	3,61
	Classe (150-200)	237	1,00	6,57	169	1,02	6,73	105	0,70	4,61
	Classe (200-500)	338	2,72	17,97	157	5,64	37,25	118	4,94	32,68
	Classe (500-1000)	198	1,32	8,71	185	2,98	19,67	155	3,45	22,83
	Classe (> 1000)	300	2,49	16,47	51	3,40	22,42	42	4,78	31,63

Tabela 15 - Dados quantitativos dos algoritmos de modelação hidrológica da Quinta das Carvalhas. Spin.works.

Quinta das Carvalhas_Municipia										
1m_Municipia	Classe (< 25)	2434	11,79	77,81	1081	7,27	47,98	699	4,57	30,17
	Classe (25-50)	4799	0,93	6,16	5047	2,10	13,86	3048	1,83	12,07
	Classe (50-100)	3107	0,68	4,47	4677	1,98	13,06	3109	2,28	15,03
	Classe (100-150)	1514	0,32	2,12	4120	1,00	6,62	3764	1,35	8,92
	Classe (150-200)	812	0,18	1,17	3387	0,63	4,15	3641	0,92	6,10
	Classe (200-500)	1748	0,43	2,85	2150	1,42	9,34	2091	2,17	14,31
	Classe (500-1000)	1039	0,27	1,77	1236	0,43	2,87	1585	0,85	5,59
	Classe (> 1000)	2197	0,55	3,66	331	0,32	2,11	295	1,18	7,81
5m_Municipia	Classe (< 25)	527	2,71	17,91	61	0,31	2,03	28	0,06	0,41
	Classe (25-50)	501	1,66	10,97	99	0,58	3,84	70	0,58	3,82
	Classe (50-100)	440	1,98	13,09	129	1,37	9,08	84	0,80	5,27
	Classe (100-150)	316	1,26	8,36	183	1,14	7,52	123	0,70	4,64
	Classe (150-200)	220	0,87	5,72	201	1,02	6,71	131	0,64	4,25
	Classe (200-500)	248	2,49	16,45	211	4,37	28,91	134	3,68	24,30
	Classe (500-1000)	199	1,45	9,59	216	2,64	17,47	161	3,10	20,48
	Classe (> 1000)	293	2,71	17,91	53	3,70	24,44	40	5,57	36,83

Tabela 16 - Dados quantitativos dos algoritmos de modelação hidrológica da Quinta das Carvalhas. Municipia

Os resultados dos algoritmos permitem a identificação dos processos de escoamento no solo, como funciona a rede. Após trabalho realizado neste âmbito (Bateira, 2005), sugere-se a existência de duas intervenções principais relativamente à circulação hídrica. Uma está relacionada com o fluxo interno rápido da água que utiliza macroporos com disposição longitudinal à vertente, o que instiga a saturação dos materiais, levando ao bloqueio dos mesmos no processo do escoamento hídrico, em sequência de um episódio chuvoso prolongado. Por outro lado, há o fluxo interno lento, resultante do longo processo de infiltração por toda a extensão das plataformas dos patamares agrícolas.

Apesar de distintos, estes tipos de processos, coincidem complementando-se entre si.

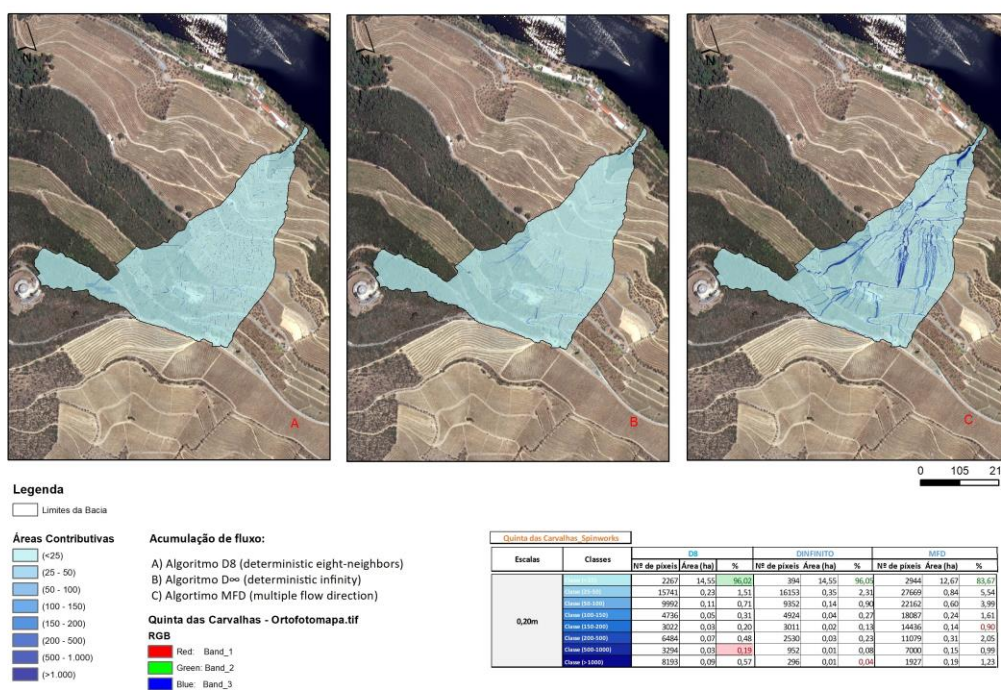




Figura 33 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; D $\infty$  ;MFD). MDE de 0,20m de resolução.

Como referido, anteriormente, estes processos complementam-se em diversos momentos do tempo. O fluxo lento acumula água no solo, devido ao demorado processo de infiltração, o que acabará por contribuir para constante manutenção de elevados níveis de humidade dos solos, saturando-os em certo ponto. É nesta fase que entra o fluxo interno rápido, pois resulta de episódios chuvosos. Nestes períodos, existe uma acumulação de água nos solos permitindo um grande corrente de escoamento do excesso de água da parte superior da vertente para a inferior. Nestes momentos o movimento da água no solo faz-se através de caminhos preferenciais que se revelam funcionais e essenciais no escoamento da mesma.

Nos casos que se verifique elevados níveis de precipitação estes dois mecanismos de escoamento cooperam para a saturação dos solos que por sua vez contribuirá para a instabilidade dos taludes dos terraços agrícolas.

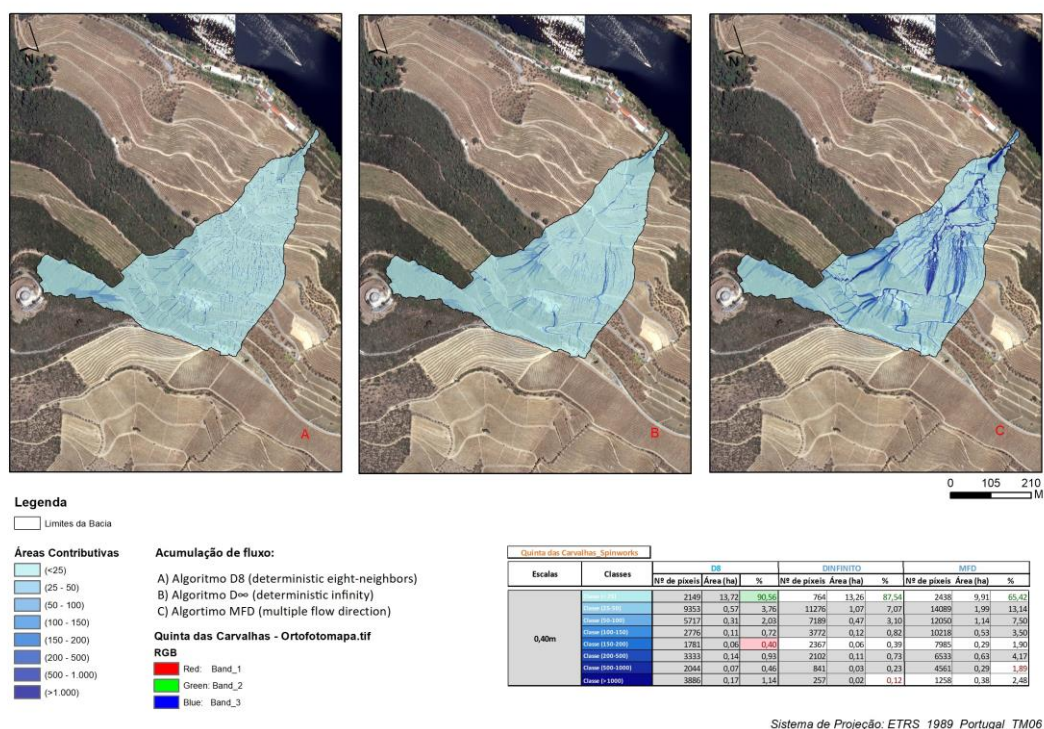


Figura 34 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; D $\infty$  ;MFD). MDE de 0,40m de resolução.

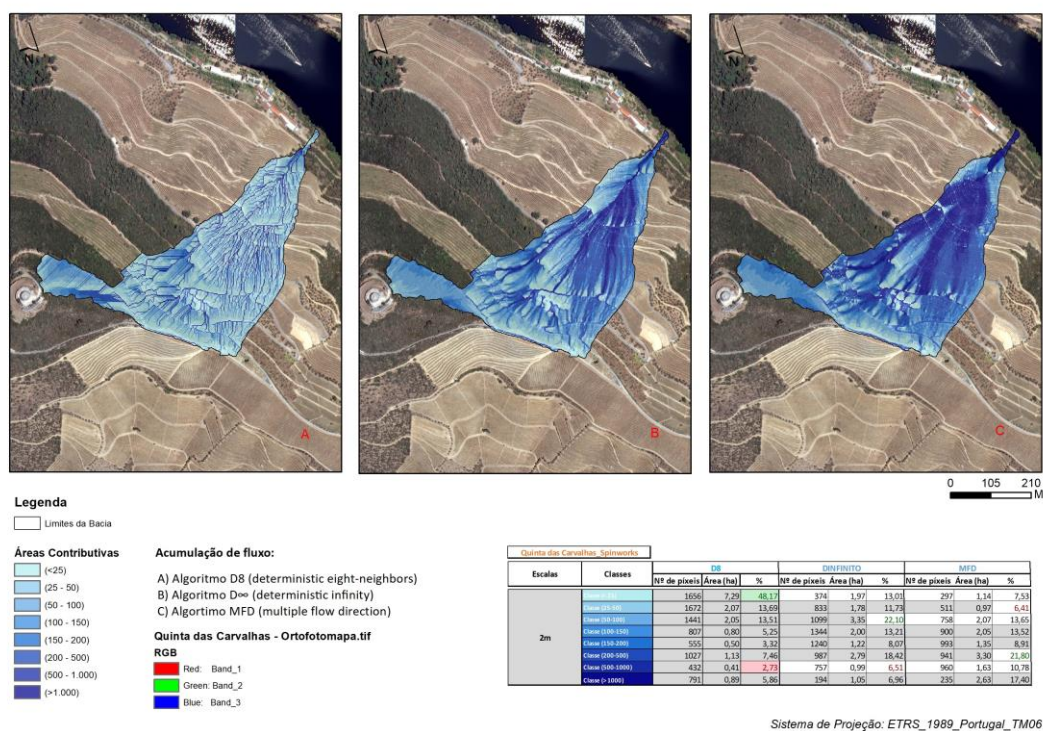


Figura 35 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; D $\infty$ ; MFD). MDE de 2m de resolução.

#### 5.1.2.1. Algoritmo D8 (por resolução)

Analisando a variação escala, com base no **algoritmo D8**, podemos verificar que a variação das áreas por classe é diversificada consoante o aumento/diminuição da mesma. Exemplo disso, através de uma pequena observação da classe dominante (<25) no algoritmo D8, na resolução de 0,20m, temos uma percentagem de área de 96%.

Não há muitas alterações com um aumento na resolução para 0,4m, mantendo-se nos 90% aproximadamente. Aumentando a resolução para 1m, a percentagem desce para os 73%, com 2m desce para 48% e com 5m para 18%, aproximadamente.

Comparando os valores mais baixos entre si, retém-se o mais baixo proveniente do MDE de 0,20m com 0,19% e por sua vez o mais alto resultante do MDE de 5m com 7%, arredondado.

Nas duas primeiras escalas de 0,20m e 0,40m, estes valores mais baixos assinalados vermelho, ocupam a classe (500-1000) e (150-200) respetivamente. O MDE de 1m e de 2m registam valores mais baixos nesta classe (500-1000). O MDE de 5m tem o seu valor mais baixo na classe (150-200).

Neste algoritmo, a classe com mais percentagem de área é sempre a mesma, sendo esta inferior (<25), excetuando o MDE de 5m que encontra o seu valor mais elevado na classe (200-500)

Nestes modelos hidrológicos a distribuição dos valores da área são mais variáveis no MDE de 5m, isto devido à sua resolução.

O emprego do fluxo D8 possibilita uma atuação igual entre o escoamento superficial e o escoamento subsuperficial, nomeadamente ao longo das linhas principais da rede de drenagem, da vertente. Este resultado pode não corresponder à realidade, tendo como base os resultados obtidos através da análise dos processos hidrológicos realizados nas áreas experimentais em questão.

#### 5.1.2.2. Algoritmo $D_{\infty}$ (por resolução)

Verificando os dados das **modelações hidrológicas do algoritmo  $D_{\infty}$**  à escala, os resultados têm semelhança ao algoritmo D8 contudo com valores um pouco mais baixos. Continua a prevalência da primeira classe (<25), como classe que ocupa mais percentagem de área e valores mais elevados, verificado nos 3 primeiros MDEs dos 5 m em análise.

A resolução de 0,20m tem 96% e dobrando para 0,40m tem 87%. Aumentando a resolução para 1m, o valor desce para 46% aproximadamente. A classe predominante nestes 3 MDEs é (<25).

Na escala de 2m a classe dominante é (50-100) com 22%.

Na resolução de 5m, a classe (200-500) contabiliza um total de 37% e no seu inverso a primeira classe (<25) apresenta o valor mais baixo 1% aproximadamente.. Observando os restantes valores mais baixos, nos MDEs de 0,20m, 0,40m e 1m, todos eles situam-se na classe (>1000). No MDE de 2m a classe com valor menos elevado é (500-1000).

Nestas duas últimas escalas de 2m e 5m as classes dominantes com valores mais elevados variam, surgindo outras classes com esse valor mais elevado, ao contrário do método D8. No método D8, a primeira classe (<25) obtinha quase sempre os valores mais elevados e neste modelo, verifica-se uma alteração nos 2 modelos com resolução maior, nomeadamente o de 2m e 5m, como já referido anteriormente.

Neste caso, o MDE com maior variabilidade entre as classes, é o de 2m.

A aplicação do fluxo  $D_{\infty}$  *“potencia a distribuição que se assemelha ao funcionamento do fluxo subsuperficial ao longo de uma matriz isotrópica”*. A modelação do escoamento subsuperficial é feita a partir *“da distribuição difusa que simula o escoamento por percolação entre partículas do solo uniforme”* (Bateira, 2015).

Seguindo a aplicação do método algorítmico, o fluxo subsuperficial desenrola-se ao longo de uma matriz, sendo pouco provável que este escoamento seja feito, sem que se tenham desenvolvido caminhos preferenciais, o que dificultaria o processo. Podem surgir



caminhos preferenciais que não tenham influência direta na rede de drenagem e na morfologia dos terraços.

#### 5.1.2.3. Algoritmo MFD (*por resolução*)

Investigando o **algoritmo MFD**, afirma-se que este segue também um pouco da tendência dos anteriores algoritmos, ou seja, nas três primeiras classes os valores de percentagem mais altos situam-se na classe (<25), tendo o MDE de 0,20m 83%, o MDE de 0,40m um valor de 65% e o MDE de 1m com 25%, ou seja, mais de metade em relação ao anterior.

O MDE de 0,20m apresenta-se com valor menos elevado na classe (150-200), com 1% aproximadamente. Em relação ao MDE de 0,40m este apresenta valor menos elevado na classe (500-1000) com 2% aproximadamente. Nomeadamente ao MDE de 1m, apresenta valor mais baixo na classe (150-200) com 4,5%.

Continuando para o MDE de 2m, a classe mais alta surge sendo (200-500) com 22% aproximadamente e no de 5m a classe continua a mesma, no entanto com 33% arredondado.

No MDE de 2m, o valor mais baixo com 6% está na classe (25-50) e no MDE de 5m com 0,24% está o valor mais baixo de todas as resoluções, incorporado na classe (<25).

O fluxo distribuído é uma modelação de processos hidrológicos que gera distribuição do escoamento atendendo à variação de altitude por parte do pixel utilizado. Este algoritmo de carácter subsuperficial aglomera duas componentes, sendo elas a modelação ao longo linhas de água de escoamento preferencial, juntando a modelação do escoamento ao longo de uma matriz de fluxo potencial. O algoritmo considera a existência de escoamento difuso com a mistura de linhas preferenciais ao longo da rede.

#### 5.1.2.4. Comparação aerofotogramas de 20cm vs 50cm

Após uma reclassificação às áreas contributivas dos voos operados pela empresa Municipia, de resolução de 1m e 5m respetivamente, obteve-se valores semelhantes aos modelos gerados pelo voo operado pela Spin.works. O objetivo é comparar os modelos da Municipia com os da Spin.works, pois a altitude dos voos é diferente, sendo que este aspeto interfere a nível quantitativo (nos valores).

No MDE de 1m de resolução da Municipia, o valor mais alto, analisando o **algoritmo D8**, surge na primeira classe, (<25) com uma percentagem de 78%, contra os 73% verificados no MDE de 1m da Spin.works. O valor mais baixo é registado na classe (150-200) com 1,17% de área ocupada, ao contrário do MDE da Spin.works, MDE este que tem um valor de 1% (0,99) e ocupa a classe (500-1000).

Verificando o **algoritmo D $\infty$** , o valor mais alto surge na primeira classe (<25) com 48% aproximadamente e o mais baixo na classe (>1000) com um valor de 2,11%. À semelhança de o MDE gerado pela **Spin.works** as classes que ocupam estes valores são as mesmas.

Atendendo ao **algoritmo MFD**, a classe mais elevada continua a ser a primeira (<25) com 30% e classe com valores mais baixos é a (500-1000) com 5,59%. Em comparação ao MDE gerado pela Spin.works, a classe com valores mais elevados continua a ser a mesma, no entanto, a classe com valores mais baixos muda, sendo (150-200) com 4,50%. É de destacar que no MDE gerado pela Municipia os valores que surgem, tanto nas classes mais elevadas ou baixas, têm tendência a apresentar valores ligeiramente superiores aos da **Spin.works**.

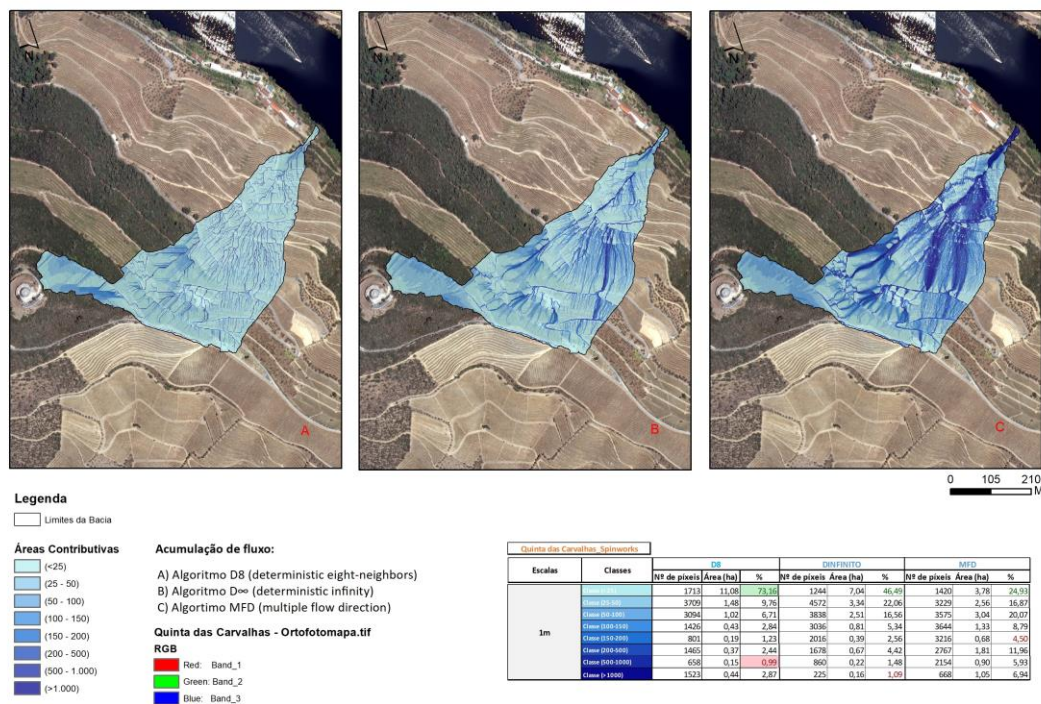


Figura 36 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; D $\infty$ ; MFD). MDE de 1m de resolução.

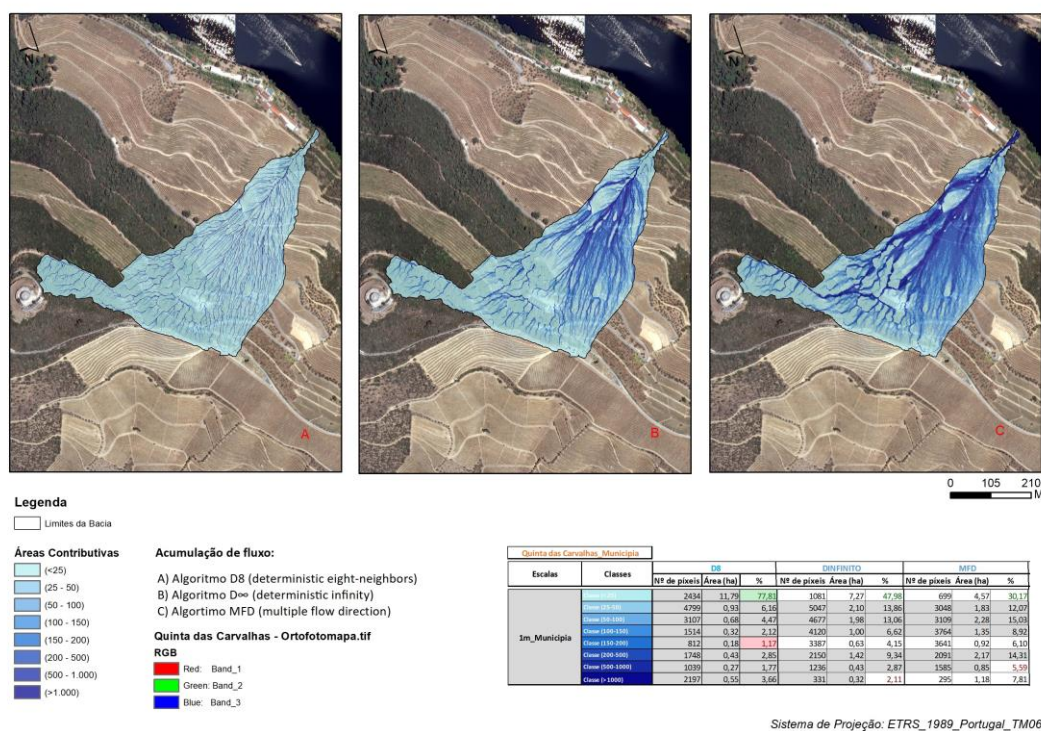


Figura 37 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; D $\infty$ ; MFD). MDE de 1m de resolução. Município.

O MDE de 5m da Município, observando o **algoritmo D8**, o valor mais alto é destacado na classe (<25) com 18% aproximadamente, o mais baixo surge na classe (150-200) com 5,72%. No MDE de 5m da Spin.works, as classes predominantes são diferentes, sendo a classe (200-500) a que apresenta o valor mais alto apresenta 18% aproximadamente e a classe mais baixa mantém-se a mesa (150-200) com 6,57%.

Observando o **algoritmo D $\infty$** , o valor mais alto surge na classe (200-500) com 28,91%, o mais baixo aparece na primeira classe (<25) com 2,03%. Comparando com o MDE da Spin.works, as classes predominantes são as mesmas, no entanto a classe mais elevada apresenta maiores valores neste MDE da Spin.works com 37,25% e inversamente, na classe mais baixa, o MDE da Spin.works apresenta resultados com valores inferiores ao da Município, nomeadamente 0,81% contra 2,03%, respetivamente.

Analisando o **algoritmo MFD**, a classe predominante é (>1000) com 36,83% e a mais baixa é a primeira classe (<25) com 0,41%. Comparando com o MDE de 5m da Spin.works, as classes predominantes alteram-se. A classe com valor mais elevado no MDE da Spin.works é (200-500) com 32,68% e a classe mais baixa no MDE da Spin.works é a mesma (<25) que a da Município com 0,24%.



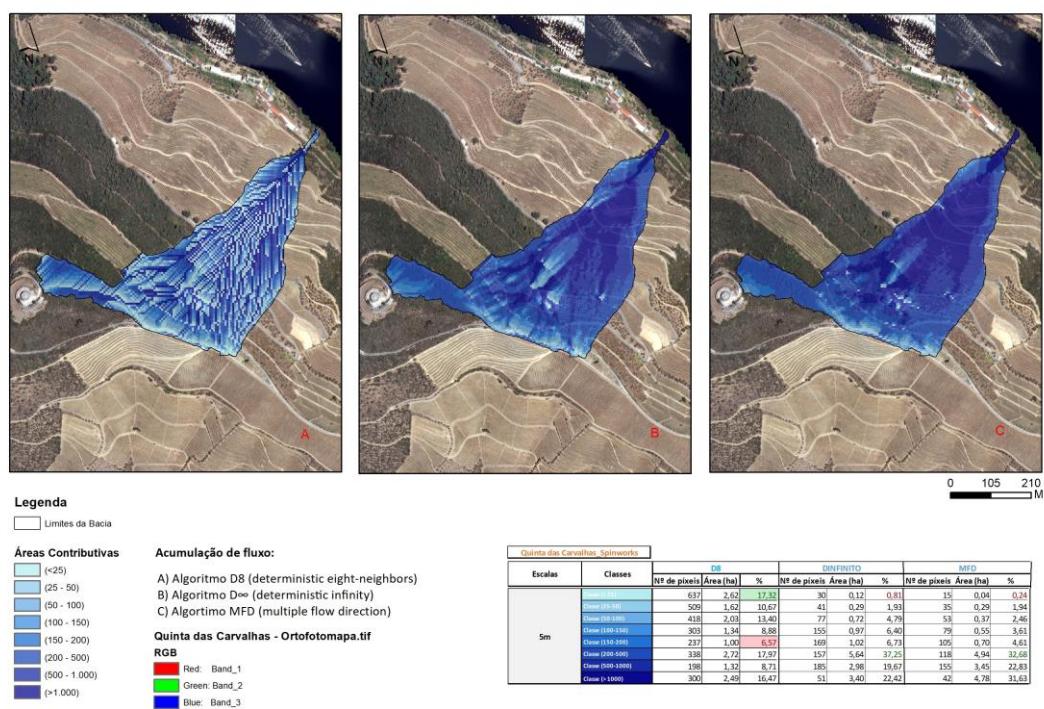


Figura 38 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; D $\infty$ ; MFD). MDE de 5m de resolução.

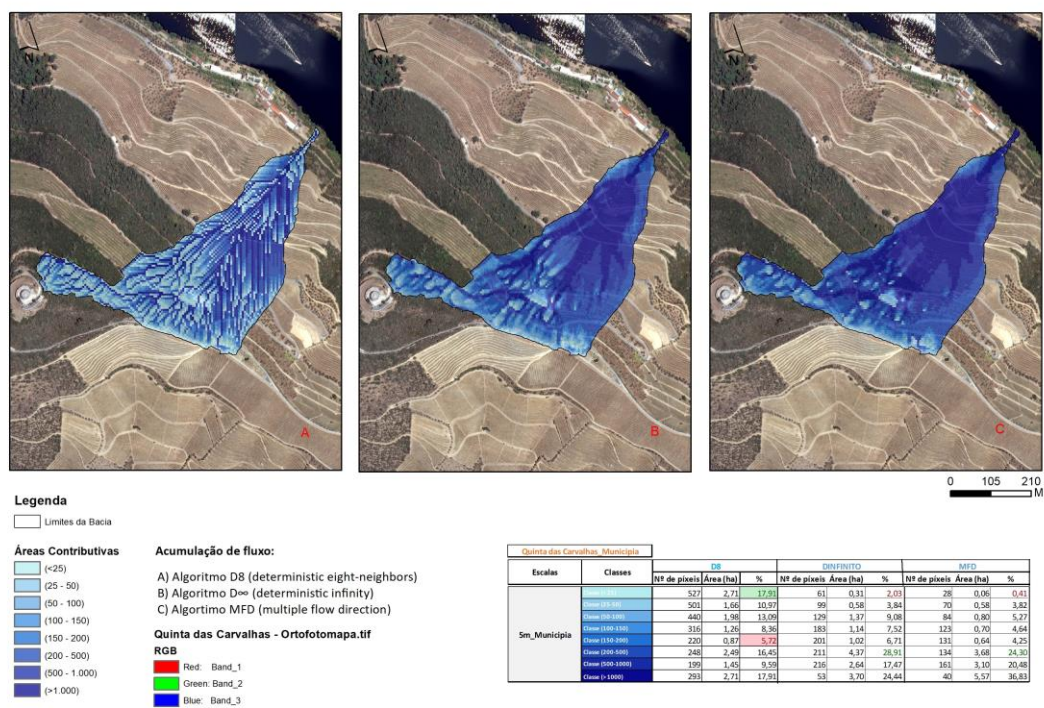


Figura 39 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; D $\infty$ ; MFD). MDE de 5m de resolução. Município.

#### 5.1.2.5. Comparação entre algoritmos (D8, $D^\infty$ , MFD)

Comparando as diferentes modelações hidrológicas, D8,  $D^\infty$ , MFD, entre si, e analisando os dados, reporta-se que existe uma tendência geral para uma melhor distribuição dos pixéis no algoritmo MFD (Figura 40).

O modelo **MFD** apresenta-se como um misto dos dois algoritmos (D8 e  $D^\infty$ ), pois engloba aspetos de ambos. Exemplo de uma maior repartição dos pixéis, surge nas resoluções de 0,2 e 0,4m, onde existe uma classe com altas percentagens, no entanto, estas são sempre inferiores em relação às classes dos outros algoritmos da mesma resolução.

A distribuição das áreas contributivas médias tem um valor significativo no algoritmo no MFD, ao contrário do D8 que se apresenta com amplas áreas de muito baixa contribuição, e do  $D^\infty$  que por sua vez reduz as áreas de contribuição médias a elevadas.

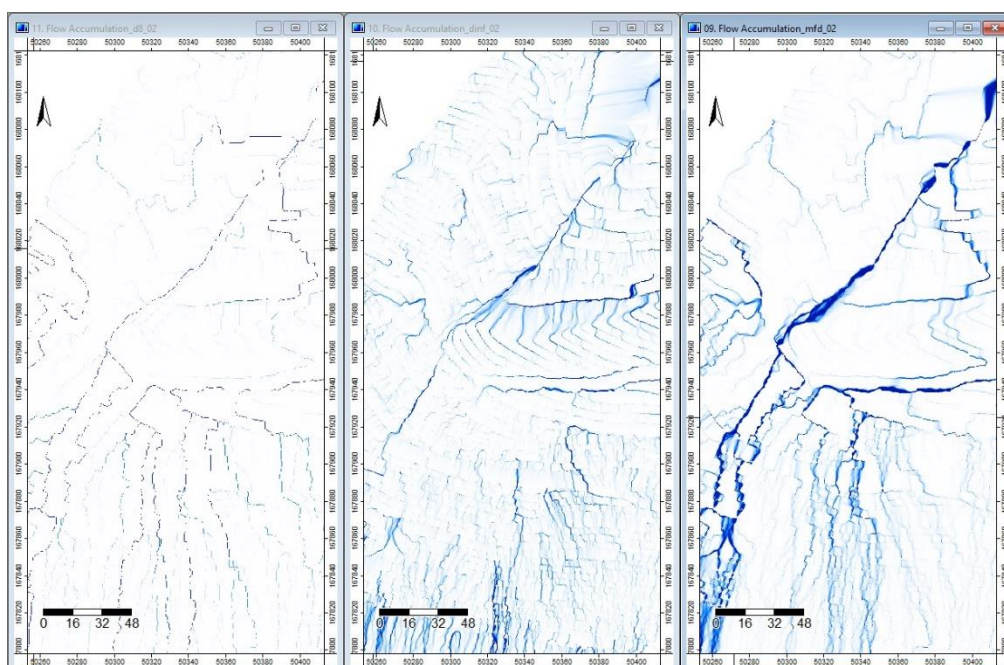
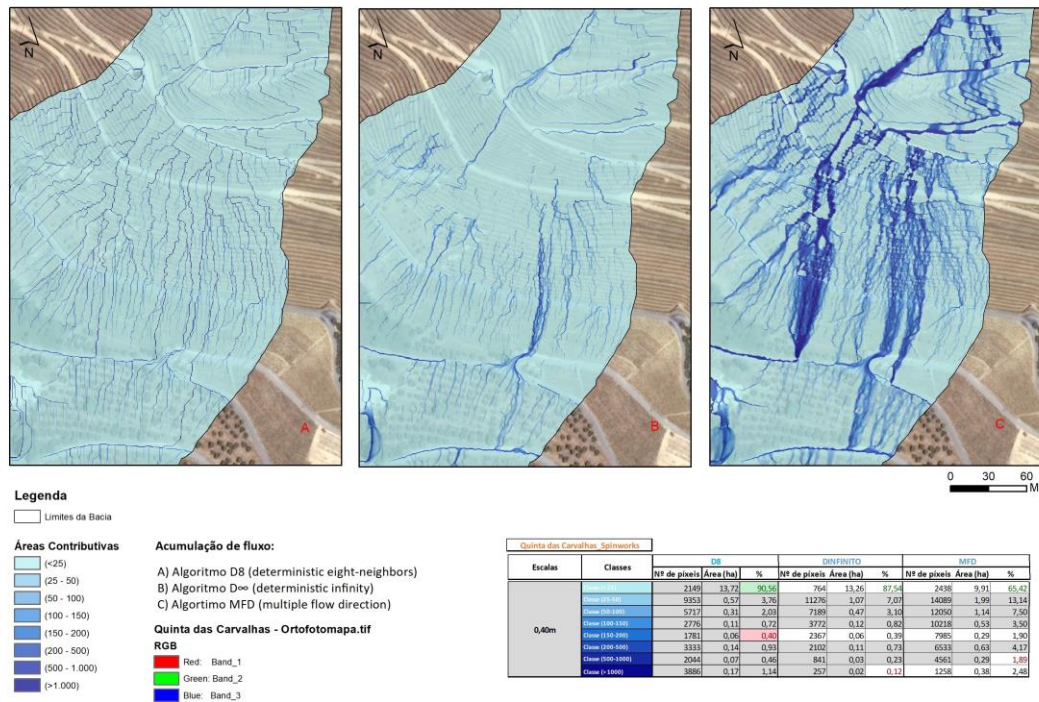


Figura 40 - Mancha visual comparativa dos diferentes algoritmos Comparação entre algoritmos (D8,  $D^\infty$ , MFD, por ordem) elaborada através do software, SAGA GIS.

Este método em si (MFD) tem variações espaciais na rede de drenagem devido à uma mais equilibrada repartição dos pixéis. Ao contrário do D8, este algoritmo permite fluxos convergentes e divergentes, resultando numa melhor leitura visual. Os dados com valores mais elevados do MFD são sempre inferiores em relação ao D8 e  $D^\infty$ , excetuando a resolução de 5m, onde o valor mais elevado é de 2,68% em relação ao D8 cujo valor é 18% aproximadamente.



A figura 41, demonstra a mesma bacia, no entanto, com recurso ao zoom na bacia hidrográfica, de modo a obter-se uma melhor compreensão visual do funcionamento de cada algoritmo de modelação hidrológica.



Sistema de Projecção: ETRS\_1989\_Portugal\_TM06

Figura 41 - Bacia hidrográfica da Quinta das Carvalhas e áreas contributivas (D8; D $\infty$ ; MFD). MDE de 0,40m de resolução. Zoom aplicado.

O modelo hidrológico D8 tem uma tendência para simplificar a rede de drenagem, identificando por vezes pequenos cursos de água secundários como principais. Este modelo apresenta sítios em que a concentração é maior, estabelecendo uma boa mancha visual e consequentemente uma maior visibilidade.

Há uma tendência de diminuição do número de píxeis em certas classes à medida que se experimenta outros modelos, surgindo outras classes a assumir valores mais elevados em resoluções maiores. Relativamente á quantidade píxeis, estes tendem a se distribuir por mais classes em resoluções mais elevadas invés de se concentrarem. (ex: 2m e 5m)

O algoritmo D $\infty$  é por assim dizer, o “oposto” do D8. Explora mais o espaço, podendo-se revelar cursos de água com mais nitidez. Na imagem, temos uma comparação entre os três algoritmos numa resolução de 20cm e notasse que o D $\infty$  assinala muitos fluxos de água, revelando-se um modelo pormenorizado. Contudo o excesso de delineação de cursos de água

pode dificultar a sua interpretação. O algoritmo pode apresentar fluxos inconstantes, não representando a realidade tão exata como seria de esperar.

Um aspeto interessante prende-se com os valores de percentagem mais elevada. Os valores mais elevados do  $D_{\infty}$  são quase sempre superiores aos valores mais elevados do algoritmo MFD.

Para a modelação SHALSTAB o algoritmo mais adequado é o **MFD** pois permite uma melhor análise do fluxo hidrológico.

## 5.2. Parâmetros físicos

A Quinta das Carvalhas, onde se insere a área experimental em questão, apresenta terrenos muito modificados pelo homem. A grande ação e atividade humana, através de maquinaria pesada e através da armação do terreno para o cultivo de vinha, reflete-se em fortes alterações dos solos.

Para a modelação física de base matemática, o SHALSTAB, foram utilizados cinco parâmetros geofísicos, sendo estes: o peso específico do solo, condutividade hidráulica, espessura do solo, ângulo de atrito interno e coesão do solo.

Relativamente aos parâmetros do SHALSTAB, estes foram obtidos através de **bibliografia científica** já publicada (Faria, 2014) e através de trabalho de laboratório. O objetivo nesta fase passa por demonstrar os valores utilizados e descrever cada parâmetro de forma a compreender como funciona o modelo SHALSTAB. São necessários estes dados todos para a simulação da suscetibilidade.

Este modelo SHALSTAB foi aplicado através do *software* SAGA GIS®. Neste modelo torna-se possível a introdução de valores máximos e mínimos dos parâmetros acima descritos, o que permite uma melhor análise de resultados, uma vez que os algoritmos utilizados pelo modelo calculam as variâncias entre os valores máximos e mínimos para cada pixel, consoante o valor inserido em cada parâmetro (Tabela 18).

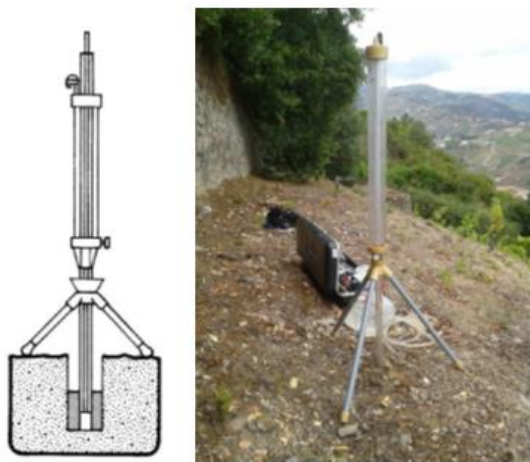
A correta determinação e aplicação destes parâmetros, faz com que seja possível compreender o comportamento hidrológicos das vertentes inseridas na área experimental com o objetivo de simular a suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente nestas áreas (Felizardo, B., 2016).

### 5.2.1 Peso específico do solo

Com o objetivo de determinar o peso específico do solo ( $\rho_s$ ) foram recolhidas 6 amostras de solo no terreno. Segundo Faria, A. (2014), as amostras foram pesadas em laboratório em conjunto com o tubo utilizado, seguidamente as mesmas foram secas e pesadas de novo, de modo a poder subtrair o valor do solo húmido pelo solo seco. Posteriormente, o resultado obtido foi dividido pelo volume do tubo. O resultado obtido representa o peso específico do solo. Com base na litologia do terreno e nas amostras obtidas, o valor é de  $16.7 \text{ kN/m}^3$ , para este parâmetro. Este valor é obtido em  $\text{kN/m}^3$  e necessita de uma reconversão em  $\text{g/m}^3$ , sendo esta a unidade que a modelação SHALTSTAB utiliza. Sendo assim, o  $\rho_s$  utilizado na área experimental, na Quinta das Carvalhas corresponde a um valor mínimo de  $1,1 \text{ g/m}^3$  e de valor máximo  $1,7 \text{ g/m}^3$ .

### 5.2.2 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica apresenta-se como o parâmetro que mede o comportamento da circulação interna da água no solo homogéneo determinando a velocidade de circulação da água (Felizardo, B., 2016).



*Figura 42 - Permeâmetro de Guelph (adaptado de Faria, A., 2014).*

Para a medição da condutividade hidráulica, utilizou-se o permeâmetro de Guelph. Este aparelho é um instrumento que permite medir a condução hidráulica saturada de campo acima do lençol freático (Figura 42).

A condutividade hidráulica, representa a facilidade em que um solo consegue transmitir um fluído em meio poroso, dependendo do tanto do fluído como do meio (Freeze e Cherry, 1979, in Gomes, 2012, Mesquita and Moraes, 2004). Atendendo Brady (1989) depende expressamente das dimensões, geometria e da configuração dos poros nos solo (in Gomes,



2012). Quando o solo está saturado, é atingido o valor máximo de condutividade hidráulica, denominando-se de condutividade hidráulica saturada ( $k_{sat}$ ) (Reichardt, 1990, in Mesquita and Moraes, 2004). É possível obter outros parâmetros hidrológicos como a Matriz de Fluxo Potencial e o Parâmetro Alfa.

O modelo SHALSTAB utiliza o valor obtido através da condutividade hidráulica saturada (Kfs), representando a velocidade média constante na qual a água percorre, geralmente por unidade de tempo, uma determinada secção do solo em questão. O valor normalmente é expresso em cm/s, contudo existe a necessidade por parte do programa, de converter a unidade de medida para m/s de modo a ser aplicado.

Segundo Faria (2014), foram feitos 8 levantamentos desta experiência no terreno, onde foi necessário a abertura de um orifício no solo, com uma profundidade de 30cm e 6cm de diâmetro. Em cada teste foram elaboradas leituras com duas cargas de pressão distintas, uma aos 5cm e outra aos 10cm. A mesma autora finaliza referindo que a condutividade hidráulica apresenta valores muito reduzidos, o que é equiparável atendendo a textura fina das formações geológicas, da área de estudo, dificultando o escoamento pelo fluxo interno da água infiltrada, o que facilita o processo de saturação dos solos (Bateira, 2013). Faria, (2014) refere que a média da Quinta das Carvalhas é de 0,000819 cm/s, representando uma baixa permeabilidade consoante a tabela 17.

GRAU DE PERMEABILIDADE	TEXTURA	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA
Permeável	Cascalhos	$10^{-1}$ cm/s a $10^{-2}$ cm/s
Baixa permeabilidade	Argila-arenosa	$10^{-2}$ cm/s a $10^{-5}$ cm/s
Impermeável	Argila homogênea	$10^{-7}$ cm/s a $10^{-9}$ cm/s

*Tabela 17 - Valores de referência de K. (Adaptado de Freeze e Cherry, 1979, in GOMES (2012, p. 24)).*

A bacia hidrográfica da área experimental em questão usualmente apresenta processos de escoamento interno, geralmente realizados através de caminhos preferenciais no solo, o que contribui para um aumento da transmissividade de fluídos nestas áreas. Para a modelação do SHALSTAB, no valor mínimo utilizado foi de 0,012900m/h de Kfs e o valor máximo de Kfs foi de 1,400000m/h.

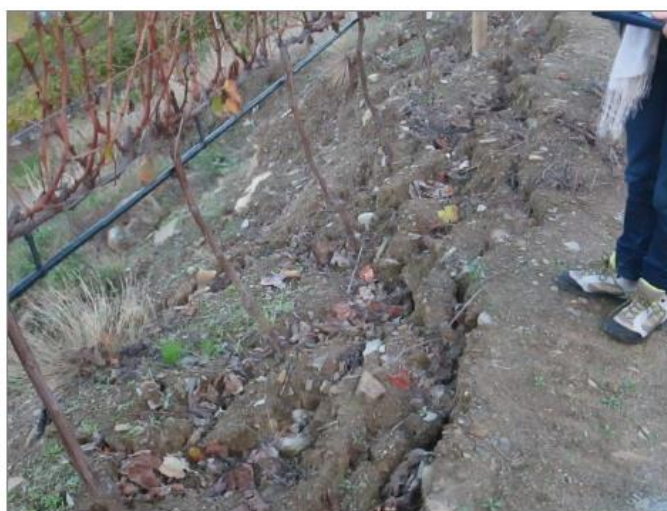
### 5.2.3. Espessura do solo

Para a modelação do SHALSTAB a espessura do solo é considerada, no entanto para a aplicação do modelo nas áreas de terraços agrícolas considera-se a espessura do solo instável (z) que corresponde ao solo mobilizado pela construção das plataformas (Figura 43).

A espessura do solo instável corresponde ao solo movimentado pela utilização de mecanização imposta pelo cultivo vinhateiro. As áreas de patamares com taludes de terra são as áreas onde este parâmetro geofísico define maior influência. Nestas áreas, a metade superior dos materiais do talude correspondem a materiais mobilizados pela construção da plataforma, que fazemos corresponder à espessura do solo a considerar. (Felizardo, 2016)

Segundo Faria, (2014) a tipologia do solo na Quinta das Carvalhas corresponde a antrossolos (WRB, 2006), sendo estes solos remexidos pela atividade humana e da maquinaria pesada na transformação o terreno.

No modelo SHALSTAB podemos alterar o valor mínimo e máximo da espessura do solo, apesar de este parâmetro surgir com valores constantes. Sendo assim foi definido um valor mínimo de 1m e um valor máximo de 1.5m de espessura.



*Figura 43 - Exemplo de cicatriz de um deslizamento na Quinta das Carvalhas. Extraído de Faria (2014)*

### 5.2.4. Ângulo de atrito interno

O ângulo de atrito interno ( $\Phi$ ) corresponde ao ângulo de inclinação da linha de resistência ao cisalhamento em relação ao plano horizontal. A definição deste parâmetro advém do modelo da equação de Mohr-Coulomb para determinar a resistência interna dos

materiais à pressão, contando para além do ângulo de atrito interno, a tensão normal ( $\sigma$ ) e a coesão do solo ( $c'$ ). (Geotechdata, 2013; Teixeira, 2012).

Como referiu Faria (2014), este parâmetro é contribuído através de diversas fontes, nomeadamente resistência ao deslizamento interpartículas, o que corresponde a metade da resistência e em grande parte a força residual dos solos. O valor deste parâmetro diminui com o aumento da plasticidade e quantidade de água (Selby, 1993a). De concluir que o volume de vazios e o tamanho das partículas também influenciam o ângulo de atrito interno (Selby, 1993a).

Para a modelação do SHALSTAB e após análise de laboratório, definiu-se o ângulo de atrito interno mínimo e máximo. Para o valor mínimo foi atribuído 45° e para o valor máximo foi atribuído 55°.

### 5.2.5. Coesão do solo

A coesão do solo ( $c'$ ) refere-se a força de resistência do solo ao cisalhamento. A coesão aumenta ou diminui em proporção da humidade existente no solo. Segundo Selby, M. (1993a), quanto menor o espaço entre as partículas do solo, maior a capilaridade do solo e maior a coesão do mesmo (Felizardo, 2016).

A coesão do solo estimada em laboratório, para a Quinta das Carvalhas e após conversão para Megapascal (MPa) é de 0,00200 MPa para o valor mínimo e 0,003000 MPa para o valor máximo.

Global minimum density (g/cm3)	1.1000000000000001
Global maximum density (g/cm3)	1.7
Global minimum conductivity (m/hr)	0.0129
Global maximum conductivity (m/hr)	1.3999999999999999
Global minimum thickness (m)	1
Global maximum thickness (m)	1.5
Global minimum friction angle (degree)	45
Global maximum friction angle (degree)	55
Global minimum bulk cohesion (MPa)	0.002
Global maximum bulk cohesion (MPa)	0.003
Parameter sampling runs	1

*Tabela 18 - Valores utilizados nos parâmetros de modelação SHALSTAB (SAGA GIS).*

## CAPÍTULO 4 – MODELAÇÕES DA SUSCETIBILIDADE, VALIDAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

A utilização do SHALSTAB tem como principal objetivo a construções de modelos preditivos de suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente. Este trabalho requer construções de diferentes modelos preditivos, com base em abordagens metodológicas, modelos quais surgem da variação de valores para os parâmetros físicos e elaborados em diversos *softwares*.

O grande objetivo na escrita desta dissertação passa pela discussão e análise de diversos cenários de suscetibilidade de diversas resoluções espaciais diferentes. As várias simulações elaboradas através do *software* SAGA GIS, para a modelação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente, utilizaram o mesmo conjunto de parâmetros físicos calculados para diferentes MDE's de diferentes resoluções. Estas diferenças nas resoluções revelam-se fundamentais, visto que podem condicionar os fatores topográficos e morfométricos utilizados.

Segundo Dietrich *et al.*, (1998), a utilização de Modelos Digitais de Elevação de boa resolução, reflete-se em impactos nos valores observados, visto que a resolução é diretamente proporcional à capacidade de avaliação da estabilidade de vertentes.

Para a modelação da suscetibilidade utilizaram-se 7 MDEs, de duas fontes distintas e com resoluções distintas respetivamente: **5 MDE foram elaborados com base nos voos da Spin.works** (modelo A – MDE de 0,20m; modelo B – MDE de 0,40m; modelo C – MDE de 1m de resolução; modelo D- MDE de 2m; modelo E – MDE de 5m); **2 MDE elaborados com base nos voos da Municipia** (modelo F – MDE de 1m; modelo G – MDE de 5m).

### 1. Simulação da Suscetibilidade

Como já referido, a simulação SHALSTAB permite incorporar os valores dos parâmetros físicos. Foram elaboradas 7 modelações provenientes da equação utilizada pelo SHALSTAB, em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica, para a área experimental em questão. Os resultados que surgem são trabalhados, recorrendo ao cálculo de frequências relativas acerca da área (definida em hectares) transformando-as para a respetivas percentagem, para cada classe de suscetibilidade (Dietrich & Montgomery, 1998, in Teixeira, 2012). As classes determinadas pela simulação de suscetibilidade foram representadas de acordo com o log Q/T (logaritmo de valor real) e classificadas de acordo com a matriz de contingência (Kohavi & Provost, 1998).

### 1.1. Modelação A (Resolução espacial de 0,20m)

Atendendo à modelação representada pelo modelo A, **(Figura 44)** as classes que surgem com uma maior representatividade de área foram: Incondicionalmente Estável e não Saturado (40,3%, 6,1ha), Incondicionalmente Estável e Saturado (31,3%, 4,7ha) e a classe Estável e não Saturado (7,4%, 1,1ha).

Atendendo à percentagem de área deslizada, foram registados 166 deslizamentos no interior da bacia hidrográfica deste modelo. As classes em destaque são: Incondicionalmente Estável e não Saturado (37,3%, 62 deslizamentos), Incondicionalmente Instável e Saturado (32,5%, 54 deslizamentos) e a classe Incondicionalmente Estável e Saturado (17,5%, 29 deslizamentos). Verifica-se então que estas 3 classes contabilizam 145 deslizamentos de um total de 166. A classe com menos ênfase é Instável e Saturado (0,6%, 1 deslizamento).

Cenários	Classes	Área (ha)	%	Cenários	Classes	Deslizamentos	%
A - MDE 0,20m	Incondicionalmente Instável	1,0	6,9	A - MDE 0,20m	Incondicionalmente Instável	54	32,5
	<-3.1	0,8	5,1		<-3.1	6	3,6
	-3.1--2.8	0,5	3,5		-3.1--2.8	1	0,6
	-2.8--2.5	0,8	5,5		-2.8--2.5	5	3,0
	-2.5--2.2	1,1	7,4		-2.5--2.2	9	5,4
	>-2,2	6,1	40,3		>-2,2	62	37,3
	Incondicionalmente Estável	4,7	31,3		Incondicionalmente Estável	29	17,5
	<b>TOTAL</b>	<b>15,1</b>	<b>100</b>		<b>TOTAL</b>	<b>166</b>	<b>100</b>

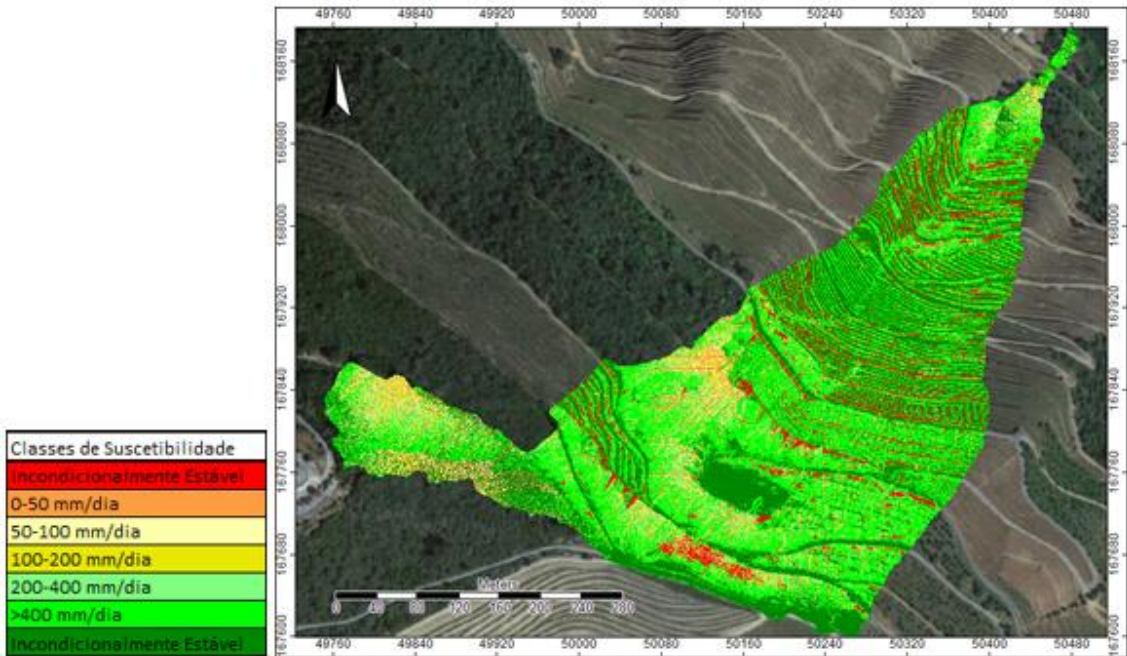


Figura 44 - Modelação de Suscetibilidade "A". Quinta das Carvalhas. (MDE 0,20m de resolução. Spin.works), modelação SHALSTAB.

### 1.2. Modelação B (Resolução espacial de 0,40m)

O modelo B, de resolução espacial de 0,40m, representado pela **figura 45**, apresenta na sua área em estudo destaque nas classes: Incondicionalmente Estável e Saturado (30,1%, 4,6ha), Incondicionalmente Estável e não Saturado (18,1%, 2,7ha) e Instável e não Saturado (13,2%, 2ha).

Neste modelo foram contabilizadas um total de 166 ocorrências de deslizamentos, sendo as classes com maior representação: Incondicionalmente Instável e Saturado (27,1%, 45 deslizamentos), Incondicionalmente Estável e não Saturado (20,5%, 34 deslizamentos), Incondicionalmente Instável e não Saturado (16,9%, 28 deslizamentos) e Incondicionalmente Estável e Saturado (13,3%, 22 deslizamentos). Estas quatro classes perfazem 129 deslizamentos de um total de 166, ou seja, cerca de 78% do total registado.

A classe com menos ênfase é Instável e Saturado (3%, 5 deslizamentos).

Cenários	Classes	Área (ha)	%	Cenários	Classes	Deslizamentos	%
B - MDE 0,40m	Incondicionalmente Instável	0,9	5,9	B - MDE 0,40m	Incondicionalmente Instável	45	27,1
	<-3.1	2,0	13,1		<-3.1	28	16,9
	-3.1--2.8	1,3	8,7		-3.1--2.8	5	3,0
	-2.8--2.5	2,0	13,2		-2.8--2.5	18	10,8
	-2.5--2.2	1,7	10,9		-2.5--2.2	14	8,4
	> -2,2	2,7	18,1		> -2,2	34	20,5
	Incondicionalmente Estável	4,6	30,1		Incondicionalmente Estável	22	13,3
	<b>TOTAL</b>	<b>15,1</b>	<b>100</b>		<b>TOTAL</b>	<b>166</b>	<b>100</b>

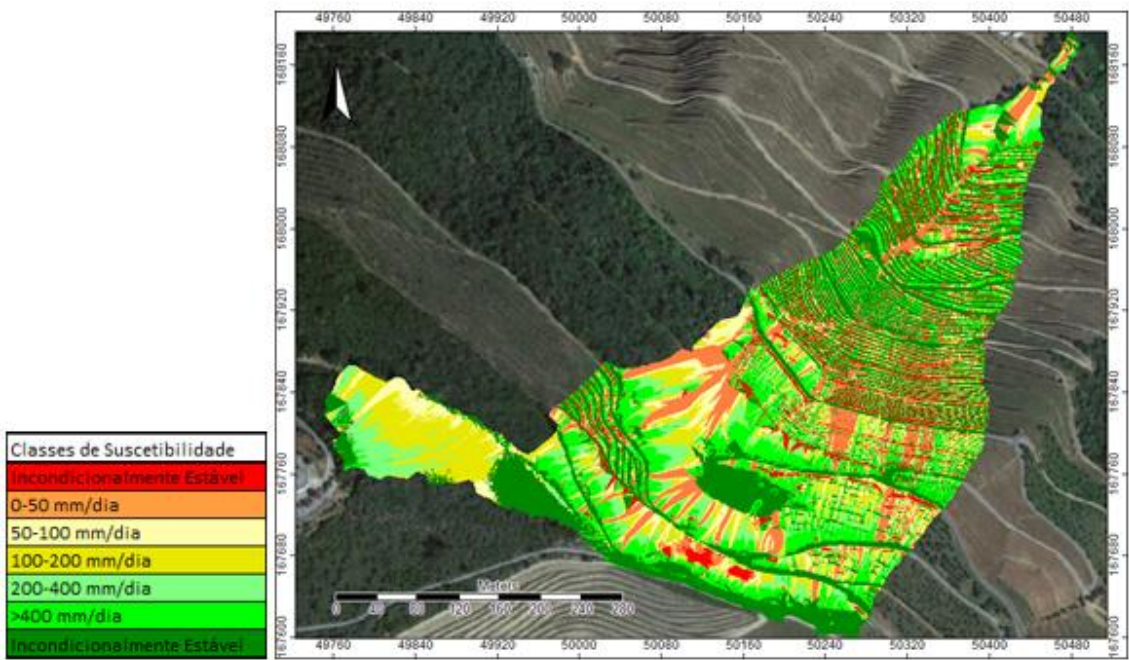


Figura 45 - Modelação de Suscetibilidade “B”. Quinta das Carvalhas. (MDE 0,40m de resolução. Spin.works), modelação SHALSTAB.



### 1.3. Modelação C (Resolução espacial de 1m)

Atendendo ao modelo C (**figura 46**), de resolução espacial de 1m, verifica-se uma maior repartição dos valores percentuais pelas respetivas classes, a nível da área e a nível de área deslizada.

A área experimental deste modelo, é ocupada com maior destaque pelas classes: Incondicionalmente Instável e não Saturado (28,6%, 4,3ha), Incondicionalmente Estável e Saturado (27,5%, 4,2ha). A classe com menos representatividade é Incondicionalmente Instável e Saturado (4,5%, 0,7ha). As restantes classes apresentam valores similares entre os 8 e 11%.

Observando a área deslizada, este modelo apresentou 166 deslizamentos, com especial destaque para as classes: Incondicionalmente Instável e não Saturado (27,7%, 46 deslizamentos), Incondicionalmente Instável e Saturado (22,9%, 38 deslizamentos). As classes Incondicionalmente Estável e Saturado (10,8%, 18 deslizamentos) e Incondicionalmente Estável e não Saturado (10,8%, 18 deslizamentos) apresentam mesmo número de deslizamentos. Estas quatro classes perfazem 120 deslizamentos num total de 166.

Cenários	Classes	Área (ha)	%	Cenários	Classes	Deslizamentos	%
C - MDE 1m	Incondicionalmente Instável	0,7	4,5	C - MDE 1m	Incondicionalmente Instável	38	22,9
	<-3.1	4,3	28,6		<-3.1	46	27,7
	-3.1~-2.8	1,6	10,4		-3.1~-2.8	21	12,7
	-2.8~-2.5	1,7	11,2		-2.8~-2.5	15	9,0
	-2.5~-2.2	1,2	8,2		-2.5~-2.2	10	6,0
	> -2,2	1,5	9,6		> -2,2	18	10,8
	Incondicionalmente Estável	4,2	27,5		Incondicionalmente Estável	18	10,8
	<b>TOTAL</b>	15,1	100		<b>TOTAL</b>	166	100

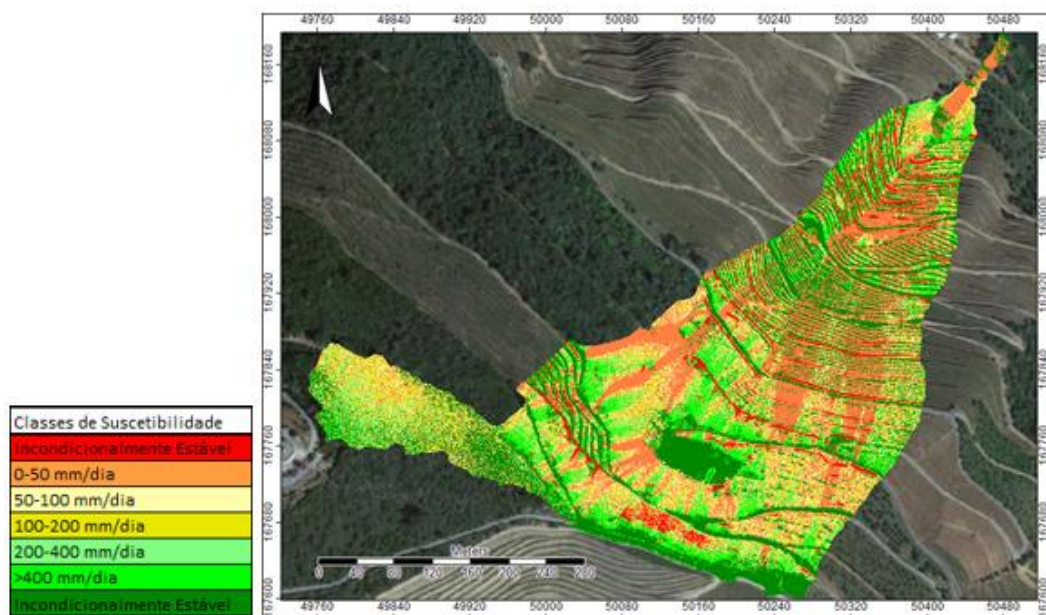


Figura 46 - Modelação de Suscetibilidade "C". Quinta das Carvalhas. (MDE 1m de resolução. Spin.works), modelação SHALSTAB.

#### 1.4. Modelação D (Resolução espacial de 2m)

A modelação D (**figura 47**), com resolução espacial de 2m, demonstrou que a bacia hidrográfica tem maior representatividade nas classes: Incondicionalmente Instável e não Saturado ( $\log Q/T < 3.1$  - 40,6%, 6,2ha) e Incondicionalmente Estável e Saturado (22,2%, 3,4ha). A classe com valores mais baixos é Incondicionalmente Instável e Saturado com 2,3% de área, ocupando apenas somente 0,4ha.

Nomeadamente à área deslizada, grande destaque para a classe: Incondicionalmente Instável e não Saturada (65,1%, 108 deslizamentos). A segunda classe com maior ênfase é Incondicionalmente Instável e Saturada (9,6%, 16 deslizamentos). Estas duas classes contabilizam 124 deslizamentos de um total de 166, ou seja, cerca de 75% do total.

Cenários	Classes	Área (ha)	%	Cenários	Classes	Deslizamentos	%
D - MDE 2m	Incondicionalmente Instável	0,4	2,3	D - MDE 2m	Incondicionalmente Instável	16	9,6
	<-3.1	6,2	40,6		<-3.1	108	65,1
	-3.1--2.8	1,9	12,5		-3.1--2.8	10	6,0
	-2.8--2.5	1,7	11,2		-2.8--2.5	12	7,2
	-2.5--2.2	1,0	6,3		-2.5--2.2	6	3,6
	> -2,2	0,7	4,8		> -2,2	7	4,2
	Incondicionalmente Estável	3,4	22,2		Incondicionalmente Estável	7	4,2
	<b>TOTAL</b>	<b>15,1</b>	<b>100</b>		<b>TOTAL</b>	<b>166</b>	<b>100</b>



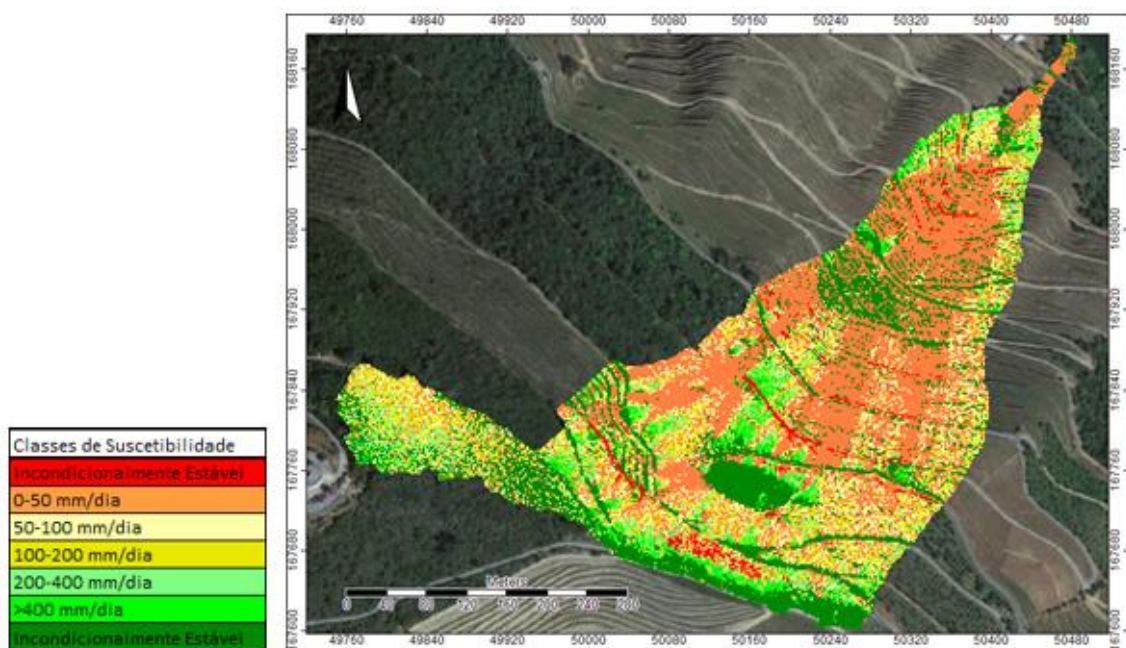


Figura 47 - Modelação de Suscetibilidade "D". Quinta das Carvalhas (MDE 2m de resolução. Spin.works), modelação SHALSTAB

### 1.5. Modelação E (Resolução espacial de 5m)

Na simulação do modelo E (**figura 48**), de 5m de resolução, as classes com mais destaque são: Incondicionalmente Instável e não Saturado (45,5%, 6,9ha), Incondicionalmente Estável e Saturado (17,8%, 2,7ha) e Instável e Saturado (16,4%, com 2,5ha). Estas três classes representam 79,7% da área experimental.

Relativamente à área deslizada, e contrariamente às outras modelações, esta modelação apresentou 159 deslizamentos, menos 7 deslizamentos que os outros modelos todos. Esta redução no número de deslizamentos, deve-se ao aumento da resolução (ex. numa resolução inferior e de maior detalhe, podem surgir 2 deslizamentos, no entanto com o aumento da resolução, perde-se o detalhe e o espaço ocupado pelo pixel é maior, sendo que os dois deslizamentos podem ser agrupados como um só).

A classe Incondicionalmente Instável e Saturado é a única que não apresenta registo de nenhum deslizamento, tendo assim um valor de 0%.

A classe Incondicionalmente Instável e não Saturado tem grande representatividade com 70,4%, com 112 deslizamentos. Segue-se então a classe Instável e Saturado com 17%, com 27 deslizamentos. A classe Instável e não Saturado surge com 8,2%, com 13 deslizamentos. Estas 3 classes contabilizam 152 deslizamentos dos 159 verificados.

Cenários	Classes	Área (ha)	%	Cenários	Classes	Deslizamentos	%
E - MDE 5m	Incondicionalmente Instável	0,1	0,7	E - MDE 5m	Incondicionalmente Instável	0	0,0
	<-3.1	6,9	45,5		<-3.1	112	70,4
	-3.1--2.8	2,5	16,4		-3.1--2.8	27	17,0
	-2.8--2.5	1,9	12,8		-2.8--2.5	13	8,2
	-2.5--2.2	0,8	5,1		-2.5--2.2	3	1,9
	> -2,2	0,2	1,6		> -2,2	1	0,6
	Incondicionalmente Estável	2,7	17,8		Incondicionalmente Estável	3	1,9
	<b>TOTAL</b>	<b>15,1</b>	<b>100</b>		<b>TOTAL</b>	<b>159</b>	<b>100</b>

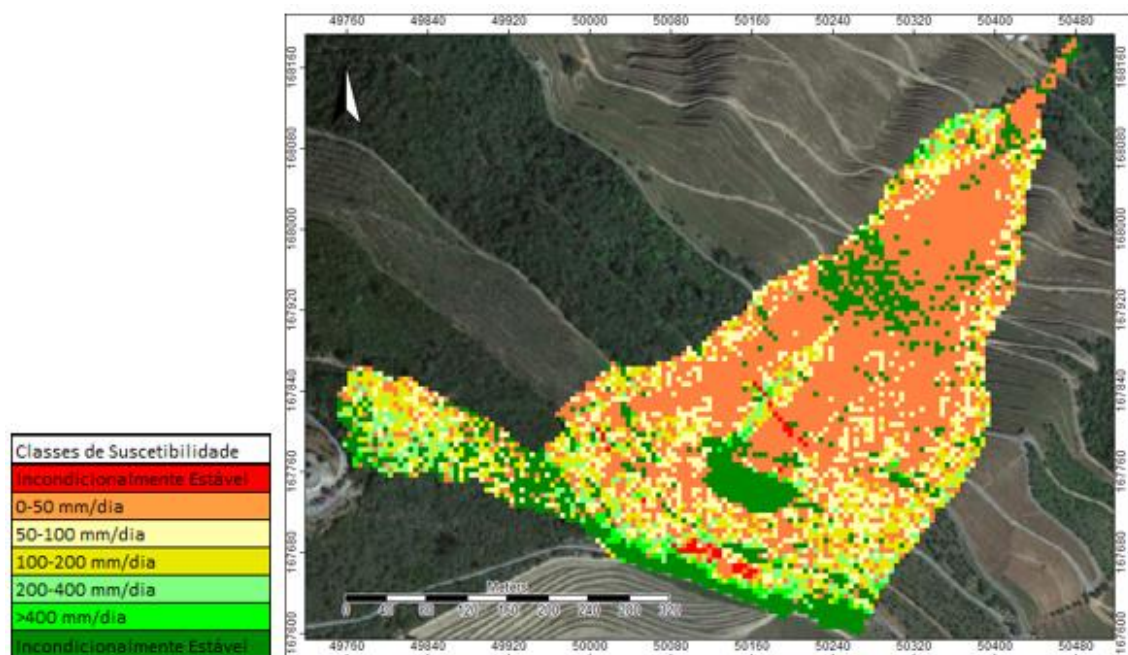


Figura 48 - Modelação de Suscetibilidade "E". Quinta das Carvalhas (MDE 5m de resolução. Spin.works), modelação SHALSTAB

## 1.6. Modelação F (Resolução espacial de 1m da Municipia)

A modelação F (**Figura 49**), de 1m de resolução obtida através dos voos da Municipia, apresenta mais percentagem de área nas classes: Incondicionalmente Instável e não Saturado (33,4%, 5,1ha), Incondicionalmente Estável e Saturado (23,3%, 3,5ha). Estas duas classes perfazem 56,7% do total da área experimental. A classe menos representativa é Incondicionalmente Instável e Saturado (5,6%, com 0,9ha).

Relativamente à área deslizada, são contabilizados 166 deslizamentos (o mesmo número de deslizamentos obtido pelos voos da Spin.works). A classe com maior destaque é Incondicionalmente Instável e não Saturado (51,8%, 86 deslizamentos), ou seja, mais de metade dos deslizamentos da área experimental localizam-se nesta classe. Segue então a

classe Instável e não Saturado (12,7%, 21 deslizamentos). Estas duas classes representam 107 deslizamentos do total anteriormente descrito, ou seja, cerca de 64,5% do total. A classe com representação mais baixa é Incondicionalmente Instável e Saturado com 4,2% e 7 deslizamentos.

Cenários	Classes	Área (ha)	%	Cenários	Classes	Deslizamentos	%
F - MDE 1m Municipia	Incondicionalmente Instável	0,9	5,6	F - MDE 1m Municipia	Incondicionalmente Instável	7	4,2
	<-3.1	5,1	33,4		<-3.1	86	51,8
	-3.1--2.8	1,5	10,1		-3.1--2.8	15	9,0
	-2.8--2.5	1,3	8,9		-2.8--2.5	21	12,7
	-2.5--2.2	1,0	6,8		-2.5--2.2	13	7,8
	> -2,2	1,8	11,8		> -2,2	16	9,6
	Incondicionalmente Estável	3,5	23,3		Incondicionalmente Estável	8	4,8
	TOTAL	15,1	100		TOTAL	166	100

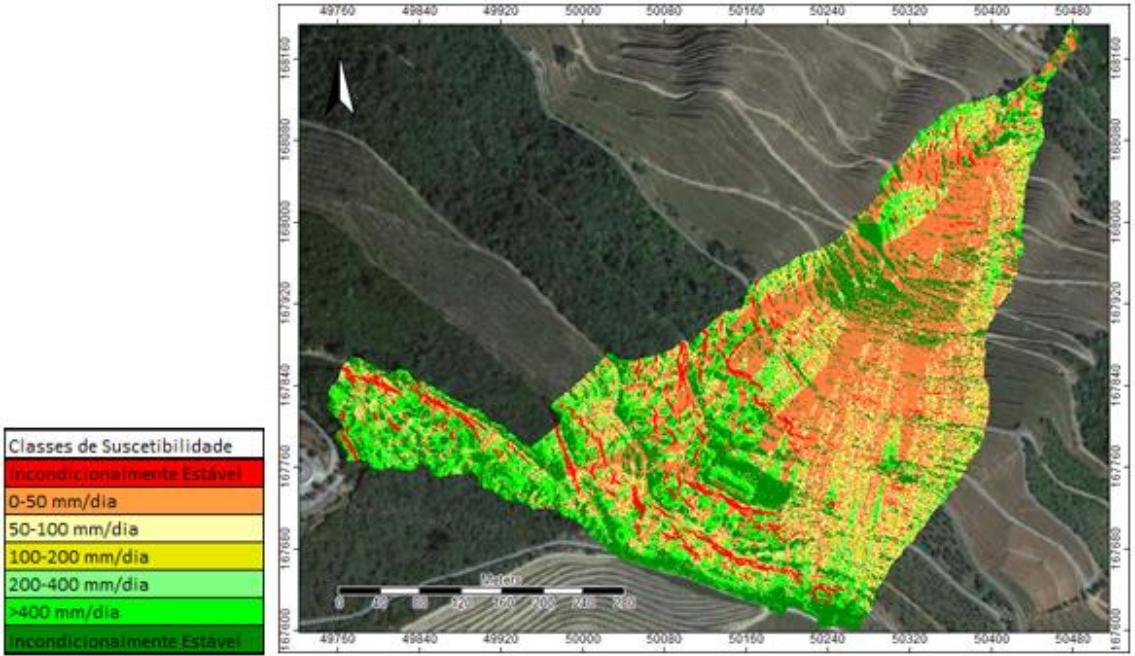


Figura 49 - Modelação de Suscetibilidade “F”. Quinta das Carvalhas (MDE 1m de resolução. Municipia), modelação SHALSTAB.

### 1.7. Modelação G (Resolução espacial de 5m da Municipia)

Atendendo à **figura 50**, de 5m de resolução obtida através dos voos da Municipia, as classes que ocupam maior percentagem de área, da área experimental em questão são: Incondicionalmente Instável e não Saturado (47%, 7,1ha), Incondicionalmente Estável e Saturado (17,9%, com 2,7ha) e Instável e Saturado (14,2%, com 2,2ha). Estas 3 classes ocupam 79,1% da área experimental. A classe menos representativa é Incondicionalmente Instável e Saturado com 0,9%, o que equivale a 0,1ha.



Nomeadamente à área deslizada, contabilizam-se 159 deslizamentos (mesma situação que a modelação E, acima descrita), invés dos habituais 166 registados em todas as outras modelações. Semelhante à modelação E, a classe com mais representatividade é Incondicionalmente Instável e não Saturado com 84,3%, ou seja, 134 deslizamentos. Segue-se então a classe Instável e Saturado com 8,2%, com 13 deslizamentos. Estas duas classes representam 92,5% do total de deslizamentos, contabilizando 147 deslizamentos dos 159 em questão.

À semelhança da modelação E, a classe Incondicionalmente Instável e Saturado apresenta valores de 0, não regista nenhum deslizamento nesta classe. A classe Incondicionalmente Estável e não Saturado surge também com valores neutros, ou seja, 0%, não se verifica nenhum deslizamento, ao contrário da modelação E nesta classe.

Cenários	Classes	Área (ha)	%	Cenários	Classes	Deslizamentos	%
G - MDE 5m Municipia	Incondicionalmente Instável	0,1	0,9	G - MDE 5m Municipia	Incondicionalmente Instável	0	0,0
	< -3.1	7,1	47,0		< -3.1	134	84,3
	-3.1--2.8	2,2	14,2		-3.1--2.8	13	8,2
	-2.8--2.5	1,7	11,0		-2.8--2.5	7	4,4
	-2.5--2.2	0,8	5,2		-2.5--2.2	3	1,9
	> -2,2	0,6	3,9		> -2,2	0	0,0
	Incondicionalmente Estável	2,7	17,9		Incondicionalmente Estável	2	1,3
	<b>TOTAL</b>	<b>15,1</b>	<b>100</b>		<b>TOTAL</b>	<b>159</b>	<b>100</b>

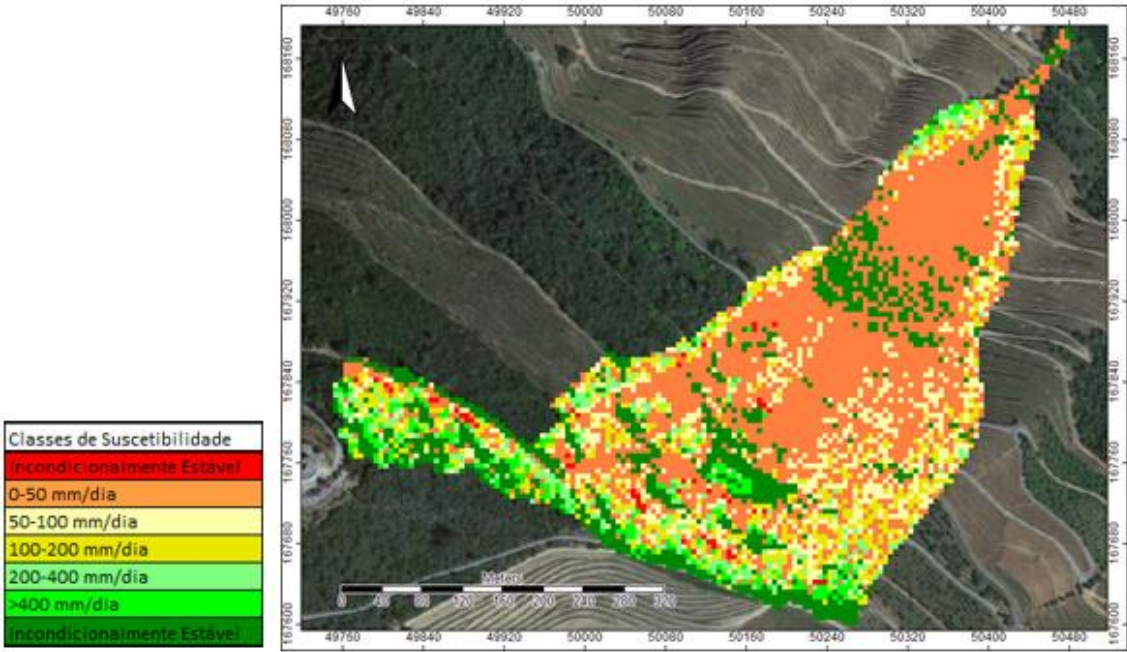


Figura 50 - Modelação de Suscetibilidade "G". Quinta das Carvalhas (MDE 5m de resolução. Municipia), modelação SHALSTAB.

## 2. Validação das Modelações de Suscetibilidade

Esta metodologia de validação tem como objetivo a demonstração do/s modelos com maior capacidade preditiva para a análise do trabalho realizado, tendo em conta a suscetibilidade destes modelos à ocorrência de movimentos de vertente. A validação foi elaborada para 7 resoluções distintas, sendo que as diversas resoluções espaciais produzem resultados diferentes, carecendo de análise. Para a validação do SHALSTAB foi utilizado o inventário de ocorrências (deslizamentos), assinalados na área experimental, localizada na Quinta das Carvalhas (ver Capítulo 3 – Aquisição e Processamento de dados). A simulação da suscetibilidade, produzida através, do SHALSTAB, utilizou como método de validação, *a matriz de confusão/tabelas de contingência*, construídas em *software* Microsoft Excel. De modo a compreender melhor este método de validação, foram calculados os seguintes índices de diagnóstico:

- TPR (“True positive rate” – rácio de verdadeiros positivos (RVP)).
- FPR (“false positive rate” – rácio de falsos positivos (RFP)).
- ACC (acurácia ou fiabilidade).
- PPV (precisão).

## 3. Comparação das Modelações de Suscetibilidade

### 3.1. Modelos de Diferentes Resoluções Espaciais Modelações A a E

Observando as modelações obtidas através destes cinco MDEs de resoluções espaciais diferentes, constata-se que:

- A modelação G concentra maior percentagem no rácio de TPR com 97% (aproximadamente) de deslizamentos corretamente classificados. No seu inverso, demonstra pouca eficiência no rácio FPR face às restantes modelações (70% de Falsos Positivos). Este índice surgiu com valores elevados, uma vez que o modelo apresenta grande percentagem de áreas classificadas para as classes suscetíveis, classificando igualmente essas localizações como área de falsos positivos. Este aspeto repercute-se na fiabilidade, sendo que este modelo E apresenta 29% de ACC.

- No sentido inverso, as modelações A e B, elaboradas a partir dos MDE's de maior resolução espacial (0,20m e 0,40m respetivamente), revelam-se com menos previsão no que

toca aos deslizamentos corretamente classificados. A modelação A apresenta valores no rácio TPR de 40% aproximadamente e modelação B de 58% aproximadamente. Este índice pode ser explicado com recurso à **tabela 19** (modelação A e B), pelo simples facto das ocorrências inventariadas se localizarem em grande parte em classes opostas de estabilidade: “Incondicionalmente Instável e Saturado” e “Incondicionalmente Estável e não Saturado (> - 2.2)”. O rácio FPR apresenta para a modelação A um valor aceitável de cerca de 22% e para a modelação B um valor rodando os 41%. Respetivamente à ACC (fiabilidade), estes cenários apresentam melhores resultados em comparação aos restantes modelos, com 78% para a modelação A e cerca de 60% para a modelação B. A elevada ACC no modelo A, é explicada através do simples facto do modelo representar em menor dimensão as áreas representativas de classes suscetíveis, sendo que ao mesmo tempo, foram registadas nestas áreas uma grande parte considerável dos deslizamentos.

- Atendendo à modelação C (1m de resolução), a taxa TPR apresenta um valor de 72%, classificando melhor os deslizamentos que as modelações A e B. No entanto, no que toca ao rácio FPR, a modelação C apresenta valores na ordem dos 50%, sendo um valor bastante elevado para esta taxa. Relativamente à fiabilidade (ACC), este modelo apresenta aproximadamente 50%, ou seja, há metade de hipótese que esteja certo/errado.

- Observando a modelação D (2m de resolução), o rácio TPR apresenta valores de cerca de 88% (valores mais elevados que modelações A, B e C). Respetivamente ao rácio FPR, surgem valores à volta dos 66% e no rácio ACC, valores na ordem dos 34%. Estes valores não são muito fidedignos no que toca à credibilidade do modelo. Isto deve-se, como já explicado anteriormente, à concentração dos deslizamentos nas classes consideradas suscetíveis.

## **2 Modelos de resoluções espaciais diferentes (*Modelações F e G*)**

- Estes modelos foram obtidos através da companhia Municipia (1m e 5m respetivamente) e visam uma comparação com os modelos, de mesma resolução espacial, obtidos através da Spin.works.

- Comparando a modelação F (1m de resolução) com a modelação C, a modelação F apresenta valores mais elevados no rácio TPR na ordem dos 78% enquanto a modelação C apresenta 72%. Neste rácio a modelação F foi capaz de identificar maior percentagem de ocorrências que realmente sucederam. Relativamente ao rácio FPR, o cenário F apresenta valores na ordem dos 58% enquanto a modelação C apresenta 50%. Neste caso em concreto, a modelação C apresenta valores mais baixos no geral, sendo mais correta neste rácio. No que toca à fiabilidade (ACC), a modelação F apresenta um valor de cerca 42% enquanto a

modelação C apresenta na ordem dos 50%, ou seja, a modelação C revela uma melhor previsão da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente do que a modelação F.

- Comparado a modelação G (5m de resolução) com o modelo E, a modelação G apresenta um rácio TPR de 97% contra os 95% apresentados pela modelação E. Nomeadamente ao rácio FPR, a modelação G apresenta 0,70% contra os 0,72% da modelação E. Neste rácio quanto mais baixo for o número, mais correta é a classificação dos Falsos Positivos, e neste campo, a modelação G supera todas a modelação E. Isto deve-se ao facto de 134 deslizamentos dos 159 contabilizados, surgirem nas classes de área suscetível à ocorrência a movimentos de vertente: “Incondicionalmente Instável e não Saturado (< -3,1)”. Respetivamente à ACC (fiabilidade), a modelação G apresenta valores de 29% contra os 26% da modelação E, ou seja, este modelo de menor detalhe é mais fiável que a modelação de mesma resolução, mas com voos de altitudes diferentes, o que interfere imensamente nos resultados finais.

### ***Visão Geral dos Resultados***

Observando a tabela XXXXXXXX, e analisando os resultados na globalidade das modelações produzidas, verifica-se que o rácio de Verdadeiros Positivos (TPR) apresenta melhores resultados para as modelações G (97%) e E (96%) respetivamente; o rácio de Falsos Positivos (FPR) apresenta valores inferiores nas modelações A (22%), B (41%); A Fiabilidade (ACC) mostrou valores superiores nas modelações A (78%) e B (59%); a precisão (PPV) foi superior para a modelação G (0,035%) e modelação E (0,033%).

Atendendo às 7 modelações produzidas, trabalhadas e analisadas e concentrando maior importância no rácio da fiabilidade considera-se a modelação A, como modelação com maior concordância com a realidade observada e descrita. Esta modelação apresenta um índice de TPR de 40% (não é o valor mais alto equiparado a outras modelações, é mesmo o mais baixo), por sua vez um índice FPR de 21% (valor mais baixo de todos, sendo que quanto mais baixo este valor, melhor é neste rácio), uma fiabilidade de 78% e uma precisão de 0,0000807%. Apresenta ainda no índice TPR/FPR uma taxa de 1,8423% sendo o maior valor comparando às outras modelações.

É ainda de referir que a modelação B (0,40m), C (1m) e F (1m Municipia) de resolução, atendendo a uma visão global dos resultados, podem ser utilizadas para intervir na área de estudo, devido aos resultados que apresentam na ACC (fiabilidade), no entanto com algumas condicionantes, pois alguns destes valores nem chegam aos 50%.

As modelações A, B, e C registaram ocorrências de movimentos de vertentes em classes de instabilidade/estabilidade completamente dispersas. Estas modelações não são tão bem aceites quanto às restantes devido à dispersão produzida no que toca à instabilidade na área experimental em questão.



Cenários	Classes	count	Ocorreu	TPR= true positive rate= TP/P	FPR= false positive rate= FP/N	Acc= Fiabilidade=TP+TN/P+N	Precisao=TP/TP+FP	TPR/FPR	F1 Medida
A – MDE 0,20m	Incondicionalmente Instável	258311	54	0,397590361	0,215810678	0,784128547	8,07462E-05	1,842310884	0,00016146
	< -3.1	198651	6						
	-3.1--2.8	140173	1						
	-2.8--2.5	219641	5						
	-2.5--2.2	300999	9						
	> -2,2	1498920	62						
	Incondicionalmente Estável	1163867	29						
	TOTAL	3787162	166						
B – MDE 0,40m	Incondicionalmente Instável	56173	45	0,578313253	0,40911789	0,59070461	0,000247775	1,413561389	0,000495338
	< -3.1	123731	28						
	-3.1--2.8	82525	5						
	-2.8--2.5	125019	18						
	-2.5--2.2	103966	14						
	> -2,2	171272	34						
	Incondicionalmente Estável	284112	22						
	TOTAL	946798	166						
C – MDE 1m	Incondicionalmente Instável	9475	38	0,722891566	0,502866325	0,496553964	0,001076002	1,437542205	0,002148805
	< -3.1	54469	46						
	-3.1--2.8	22942	21						
	-2.8--2.5	24638	15						
	-2.5--2.2	18284	10						
	> -2,2	23688	18						
	Incondicionalmente Estável	68042	18						
	TOTAL	221538	166						
D – MDE 2m	Incondicionalmente Instável	924	16	0,879518072	0,659977291	0,338012987	0,005807478	1,332648992	0,011538766
	< -3.1	15019	108						
	-3.1--2.8	4941	10						
	-2.8--2.5	4256	12						
	-2.5--2.2	2417	6						
	> -2,2	1831	7						
	Incondicionalmente Estável	8483	7						
	TOTAL	37871	166						
E – MDE 5m	Incondicionalmente Instável	43	0	0,955974843	0,72658186	0,265292981	0,033406593	1,315715262	0,064557231
	< -3.1	2687	112						
	-3.1--2.8	1039	27						
	-2.8--2.5	781	13						
	-2.5--2.2	312	3						
	> -2,2	99	1						
	Incondicionalmente Estável	1092	3						
	TOTAL	6053	159						
F – MDE 1m Municipia	Incondicionalmente Instável	8584	7	0,777108434	0,579923025	0,419373133	0,001466342	1,340019969	0,002927161
	< -3.1	49588	86						
	-3.1--2.8	16092	15						
	-2.8--2.5	13710	21						
	-2.5--2.2	10602	13						
	> -2,2	17705	16						
	Incondicionalmente Estável	35196	8						
	TOTAL	151477	166						
G – MDE 5m Municipia	Incondicionalmente Instável	54	0	0,968553459	0,701305138	0,290244688	0,035007956	1,381072812	0,067573497
	< -3.1	2778	134						
	-3.1--2.8	897	13						
	-2.8--2.5	670	7						
	-2.5--2.2	315	3						
	> -2,2	237	0						
	Incondicionalmente Estável	1102	2						
	TOTAL	6053	159						

## CONCLUSÃO

Uma pequena fração deste trabalho dedica-se exclusivamente à Quinta do Bomfim (RDD) e à análise de diversos tipos de Modelos Digitais de Elevação, uns criados de base a partir dos pontos e curvas de nível e outros MDEs criados a partir do Modelo Digital de Elevação (0,20m para 0,4m, 1m, 2m e 5m respetivamente), os quais se denominaram de “generalizados”.

Recorreu-se à ferramenta *Raster calculator* do *software* ArcMap, subtraindo os MDEs originais criados a partir dos pontos pelos “generalizados” de forma a compreender se houve muitas alterações na criação destes modelos “generalizados”. Foram aplicadas classes a estes Modelos Digitais de Elevação de modo a compreender se o MDE original recortava a vertente, atribuía valores positivos, negativos ou se se mantinha estável em relação ao MDE “generalizado”. A utilização da ferramenta *Slope*, do *software* ArcMap, permitiu uma sobreposição com os resultados do *Raster Calculator*, dos quais foram possíveis tirar diversas relações. É possível verificar que numa só classe de declives, surgem as três classes atribuídas, ou seja, numa só classe de declives podem surgir recortes/aumentos/estabilização das vertentes.

Estes modelos “generalizados” foram sujeitos a uma reclassificação onde se procedeu à comparação com os modelos originais de forma a compreender a sua transformação, se perdem área, ou se ganham. Há uma ligeira tendência para a perda de área no desenrolar de processo, no entanto, pouco significativa. À medida que se diminui cada vez a resolução, surgem mais perdas de áreas no processo.

Esta dissertação teve um grande objetivo de análise comparativa da utilização de MDE's de diferentes resoluções na suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente na Quinta das Carvalhas, socorrendo-se de sete Modelos Digitais de Elevação (MDE), elaborados com recurso ao *software* ArcMap.

Este estudo concentrou-se em comparações entre diversos cenários de suscetibilidade, de modo a compreender as suas potencialidades para a definição dos processos de instabilidade de taludes em patamares agrícolas. De modo a completar esta análise comparativa, foram utilizadas distintas resoluções espaciais, trabalhadas através de diversas metodologias, estas que se revelaram determinantes para a análise e compreensão dos resultados finais.

Para dar seguimento a esta análise, aplicou-se o modelo matemático de base física SHALSTAB, o que permitiu simular (para as diversas resoluções em questão) a suscetibilidade da área experimental da Quinta das Carvalhas.

A modelação SHALSTAB utilizou como suporte fatores topográficos, referentes aos declives e áreas de contribuição (a/b). Estes fatores topográficos representam o modelo de estabilidade e o modelo hidrológico, que serviram de base para as 7 “modelações de suscetibilidade”.

O modelo de estabilidade revelou grandes dissimetrias nas diferentes modelações produzidas, visto que a resolução espacial apresentou grande detalhe altimétrico para os modelos de maior escala (0,20m e 0,40m) face às restantes modelações de menor escala (1m, 2m e 5m de resolução). O modelo de estabilidade apresentou, para estas resoluções de maior escala, um grande detalhe altimétrico e uma grande aproximação com a realidade, sendo possível observar com grande pormenor o nível dos taludes de terra das plantações vinícolas. Este fator revelou-se determinante para a validação dos modelos.

Relativamente ao modelo hidrológico, este foi elaborado para todos os algoritmos. Para a simulação do SHALSTAB foi utilizado o algoritmo MFD/MD8 (*Multiple Flow Direction*), no entanto, foram produzidos modelos hidrológicos com base nos algoritmos D8 (*Deterministic Eight-Nodes*),  $D^\infty$  (*Deterministic Infinity*). Estes modelos foram sujeitos a uma reclassificação de modo a entender as assimetrias entre os diversos modelos hidrológicos, à medida que se vai mudando de resolução espacial. Foi elaborada uma análise a estes três algoritmos, quantitativa e qualitativa, com o objetivo de entender o funcionamento e comportamento destes algoritmos.

A criação de duas tabelas com a reclassificação dos algoritmos de modelação hidrológica, das áreas contributivas, assumem um pouco de destaque pois após a quantificação destes dados, compreende-se que à medida que a resolução vai diminuindo (de 0,20m para 5m) as classes predominantes lentamente vão mudando e os valores muito acentuados, vão-se dispersando por outras classes.

A validação das sete modelações obtidas através da simulação do SHALSTAB, foi realizada com recurso a tabelas de contingência, tendo como base o inventário de deslizamentos do local de estudo em questão.

Através da comparação feita a partir da validação das tabelas de contingência é possível concluir que das 7 modelações produzidas, são as modelações D e E que concentram

maior taxa de TPR concentrado. As modelações com menos FPR foram as A, B e G. Nomeadamente à ACC a modelação A foi a que teve valor mais alto. De referir que a ocorrência de movimentos de vertente com base no inventário realizado, teve uma grande dispersão pelas classes de suscetibilidade nos modelos de maior detalhe (0,20m, 0,40m e 1m de resolução espacial) e no seu inverso teve uma grande aglomeração em certas classes nos modelos de menor detalhe (2m e 5m de resolução espacial). Verifica-se assim uma tendência nos modelos, em quanto maior for a resolução espacial/mais detalhe, menor é o tamanho das áreas abrangidas nas classes de suscetibilidade. Sendo assim, quanto menor a área das classes de maior suscetibilidade, menor será a probabilidade de deslizamentos se sobreporem nessas áreas. Por outras palavras, quanto maior for detalhe do modelo, melhor é a identificação de cada deslizamento, enquanto pelo contrário, quanto menor for o detalhe, poderá tendência de dois deslizamentos se agruparem somente como um. Nas modelações A e B o valor de TPR é menor (como já referido), devido à dispersão verificada, uma vez que a maior parte dos deslizamentos ocorreu em áreas de menor suscetibilidade, contribuindo assim então para o índice de falsos negativos.

É importante referir que da construção dos 7 modelos de suscetibilidade, 5 modelos foram obtidos através aerofotogramas capturados a 100m de altitude. Os restantes 2 modelos de suscetibilidade foram obtidos através de aerofotogramas capturados a 500m de altitude. As empresas **Spin.Works** e **Municipia** operaram os voos de *drone* e recolheram as imagens, a partir das quais, foi possível a construção destes Modelos Digitais de Elevação.

Os voos foram realizados a altitudes diferentes e o presente trabalho visou essa análise. Os modelos da Municipia obtidos foram disponibilizados pelo docente, com resoluções espaciais de 1 e 5m respetivamente. Ao analisar as tabelas de contingência, verifica-se que os valores quantitativos alteram-se quando comparando os MDEs da **Spin.works vs Municipia**. O mesmo acontece nos modelos hidrológicos e de estabilidade. A principal conclusão é que a altitude de voo estabelecido tem uma grande influência na produção e análise de Modelos Digitais de Elevação. Quando um voo é elaborado a uma altitude maior, surge tendência para a generalização e quando a altitudes mais baixas, há tendência para a segregação, o que permite uma análise completamente diferente.

A resolução desempenha um papel crucial na análise à suscetibilidade de ocorrência de movimentos de vertente, pois variando entre resoluções de alto detalhe e de menor detalhe, obtém-se resultados completamente diferentes, como possível observar através das tabelas de contingência.

Para trabalhos futuros, revela-se importante proceder à simulação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente, através do modelo matemático de base física, SHALSTAB na Quinta do Bomfim, como também proceder à realização de um inventário, numa certa área experimental. Este estudo poderá se revelar de total interesse, tendo em conta os processos de instabilidade poderão desaparecer através dos trabalhos de recuperação de taludes que foram possíveis de ser observados nesta quinta. A identificação do sistema de drenagem poderá ser um passo importante para a aplicação deste trabalho.

Na Quinta das Carvalhas é de referir também que se torna importante refletir sobre a reavaliação do inventário e atualização do mesmo, pois este trabalho teve como base um inventário realizado à cerca de 3 anos e com a intervenção antrópica na área de estudo, os processos de instabilidade tendem a ser eliminados/criados. A reconstrução/recuperação dos taludes de terra está sempre em desenvolvimento e estes processos interferem na dinâmica natural dos solos e das vertentes.

Para trabalhos futuros, é necessária a elaboração mais testes laboratoriais, com a explicação detalhada de como se chega aos resultados, de modo a permitir uma melhor experiência no trabalho. As experiências de campo ganham uma importância fulcral, visto que são a partir destas, que se obtém os resultados finais para a simulação da suscetibilidade. Estes aspetos ajudam na inserção dos parâmetros físicos, visto que um bom tratamento destes dados, pode produzir resultados mais fidedignos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aleotti, P.; Chowdhury, R. (1999) - Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Vol. 58. n.º 1 (1999). pp. 21-44. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1007/s100640050066>>. 1435- 9529
- Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., Van Gool, L., (2008) - Speeded-Up Robust Features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding* Volume 110, Issue 3, June 2008, Pages 346-359
- Bateira, C. (2001). Movimentos de vertente no NW de Portugal, Susceptibilidade geomorfológica e sistemas de informação geográfica. Tese de Doutoramento, Faculdade de Letras da Universidade do Porto.
- Bateira, C. (2015). Geometria dos terraços agrícolas e modelação da instabilidade de vertentes (Vale do Douro – Portugal). *Geosp – Espaço e Tempo (Online)*, v. 19, n. 2, pp.263-284.
- Bateira, C. (2014) Movimentos de vertente no norte de Portugal: importância do comportamento hidrológico das formações superficiais. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 15, n. 4, p. 551-565.
- Bateira, C.; SOARES, L. (1997) Movimentos de massa no norte de Portugal: fatores da sua ocorrência. *Territorium*, n. 4, p. 63-77.
- Baum, R. L., Savage, W. Z., & Godt, J. W. (2002). TRIGRS - A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis. US geological survey open-file report, 424, 38.
- Baum, R. L., Savage, W. Z., & Godt, J. W. (2008). TRIGRS- A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0, US Geological Survey Open-File Report 2008 –1159, Disponível em: <http://pubs.usgs.gov/of/2008/1159>
- Beven, K. J. & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69. doi:10.1080/02626667909491834.
- Brandão, T. F., Santos, R. L., (2009) O Uso de Imagens SRTM na Modelagem de Fenômenos Hidrológicos (Escoamento Superficial). *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*.
- Buarque, D. C., Fan, F. M., Paz, A. R., Collischonn, W. (2009) Comparação de Métodos para Definir Direções de Escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* vol. 14, n.2.

Campbell, J.B., & Wynne, R.H. (2011). Introduction to Remote Sensing: Guilford Press. Cap. 1 - History and Scope of Remote Sensing. ISBN: 9781609181765. Disponível em: <https://books.google.pt/books?id=zgQDZEya6foC>

Carrara, A.; CROSTA, G. & FRATTINI, P. (2003) – Geomorphological and Historical Data in Assessing Landslide Hazard. Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 28: 1125-1142

Casaca, J., Matos, J., & Baio, M., (2000). Topografia Geral, 3ª Edição. Lidel, Lisboa, p.306., ISBN: 972-757-135-2

ClouddMapper, (2017) - Encontro Cloudmapper "VANTs e Geotecnologias / instabilidade de vertentes e agricultura de precisão no Alto Douro Vinhateiro"

Crozier, M.J. (2004) - Management frameworks for landslide hazard and risk: Issue and options. In T.Glade, M. Anderson & M.J. Crozier (Eds.) Landslide Hazard and risk. (pp.331-350) West Sussex: Wiley.

Chuvieco, E., (1995). Fundamentos de Teledetección Espacial. 2ª ed. Madrid: Ediciones Rialp.

Crombez, K. M., (2008) Comparing Flow Routing Algorithms for Digital Elevation Models. Digital Terrain Analysis, Geo428.

Cruden, D.M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (Ed.), Landslides: investigation and mitigation (Special Report). Washington, DC, USA: National Research Council, Transportation and Research Board Special Report 247, pp 36-75.

Cruden, D.M., 1991. A simple definition of a landslide. Bulletin International Association for Engineering Geology, 43: 27-29.

D. Fritsch, J. Leissner, R. Davies, F. Remondino & R. Caffo (Ed.), (2012) Progress in Cultural Heritage Preservation: 4th International Conference, EuroMed 2012, Limassol, Cyprus, October 29 – November 3, 2012. Proceedings (pp. 40-54). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

d'Oleire-Oltmanns S, Marzloff I, Peter K, et al. (2012) Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. Remote Sensing 4: 3390–3416.

Dietrich, W. E., Reiss, R., Hsu, M. & Montgomery, D. R. (1995). A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. Hydrological Processes. Vol. 9. n.º 3-4. pp. 383-400. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.3360090311>

Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., & Ibsen, M.-L. (Ed.) (1996). Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes. John Wiley & Sons, Chichester. 251 p.



- Eisenbeiß, H., (2009) - UAV Photogrammetry. Dissertation, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.
- Eisenbeiss, H., Zhang, L., (2006) - Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI-5, 90e96.
- Endreny, T. A., Wood E. F., (2003) - Maximizing Spatial Congruence of Observed and DEM-Delineated Overland Flow Networks. Int J. Geographical Information Science, vol. 17, nº 7.
- Erskine, R. H., Green, T. R., Ramirez, J. A., Macdonald, L. H., (2006) - Comparison of Grid-Based Algorithms for Computing Upslope Contributing Area. Water Resources Research, vol. 42.
- Fabris M., Pesci A. (2005) - Automated DEM extraction in digital aerial photogrammetry: precisions and validation for mass movement monitoring. Annals of Geophysics, 48 (6): 973-988. doi: <http://dx.doi.org/10.4401/ag-3247>
- Falcão, I. O. (2012). Extracção semi-automática tridimensional dos principais elementos de um perfil rodoviário a partir de dados LiDAR. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Disponível em: [http://enggeoespacial.fc.ul.pt/ficheiros/teses/tese\\_ines\\_falcao.pdf](http://enggeoespacial.fc.ul.pt/ficheiros/teses/tese_ines_falcao.pdf).
- Faria, A. (2014). Avaliação da Suscetibilidade a Movimentos de Vertente por Método Matemático de Base Física e Base Estatística: Estudo Comparativo no Vale do Douro Vinhateiro. Porto: Dissertação de Mestrado em Riscos, Cidades e Ordenamento do Território apresentada à Faculdade de Letras da Universidade do Porto.
- Fernandes, N. F.; Guimarães, R. F.; Gomes, R. A.; Vieira, B. C.; Montgomery, D. R.; Greenberg, H. (2004) - Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. Catena, v. 55, n.2, p.163-181,
- Flageollet, Jean-Claude (1989) - Les mouvements de terrain et leur prévention. Collection Géographie, Paris, Masson, 224 p.p
- Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., & Carbonneau, P. E. (2013). Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. Earth Surface Processes and Landforms, 8(4), 421-430. doi:10.1002/esp.3366
- Garcia, R., (2012) - Metodologias de avaliação da perigosidade e risco associado a movimentos de vertente: aplicação na bacia do rio Alenquer. Tese de doutoramento, Geografia (Geografia Física), Universidade de Lisboa, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, 2012. link: <http://repositorio.ul.pt/handle/10451/7377>

Glade, T.; Anderson, M.; Crozier, M.J. (Eds.) (2005) - Landslide Hazard and Risk. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester.

Gomes, M., (2012) - Análise da influência da condutividade hidráulica saturada dos solos nos escorregamentos rasos na bacia do rio Guanxiduba (SP). São Paulo, Brasil: Universidade de São Paulo, Departamento de Geografia

Gonçalves, J. A. & Henriques, R. (2015). UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 104, 101-111. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009>

Gooch, B., Sloan, P.-P. J., Gooch, A., Shirley, P. S., and Reisenfeld, R. (1999) - Interactive technical illustration. In 1999 ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, ACM SIGGRAPH, 31–38. ISBN 1-58113-082-1.

Guarnieri A., A. Vettore, F. Pirotti, M. Menenti, M. Marani, (2009) - Retrieval of small-relief marsh morphology from Terrestrial Laser Scanner, optimal spatial filtering, and laser return intensity Geomorphology, 113 (1–2) , pp. 12-20

Guzzetti, F.; Carrara, A.; Cardinali, M.; Reichenbach, P. - Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. Geomorphology. Vol. 31. n.º 1-4 (1999b). pp. 181-216. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000086086500009>. 0169-555X

Hatzopoulos, J. (2008). Topographic Mapping: Covering the Wider Field of Geospatial Information Science & Technology (GIS & T), Universal-Publishers: Boca Raton, FL., p.717. ISBN 158112986-6

Hladik C, Alber M (2012) - Accuracy assessment and correction of a LIDAR-derived salt marsh digital elevation model. Remote Sens Environ 121:224–235

Huabin, W.; Gangjun, L.; Weiya, X. & Gonghui, W. (2005) - GIS-based Landslide Hazard Assessment: an Overview. Progress in Physical Geography, Vol. 4; Ed. 29: 548–567.

Huising, J., Gomes Pereira, L. (1998) - Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 53(5): 245-261.

Hutchinson, J.N. (1968) - Mass Movement. In Fairbridge, R.W. (Ed.), Encyclopedia of Geomorphology, Reinhold, New York, p.688-695.

Hutchinson M., Gallant J., (2000): Digital Elevation Models and representation of terrain shape. In: J. Wilson, J. Gallant (Eds.), *Terrain Analysis: Principles and Applications.*, pp. 29–50. Wiley & Sons, Inc.

Iverson, R. M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water resources research*, 36(7), pp.1897-1910.

Johnson, K., Nissen, E., Saripalli, S., Arrowsmith, J. R., McGarey, P., Scharer, K., & Blisniuk, K. (2014). Rapid mapping of ultra-fine fault zone topography with Structure from Motion. *Geosphere*.

Kim, D., Im, S., Ho Lee, S., Hong, Y. & Chang, K. (2010). Predicting the Rainfall-Triggered Landslides in a Forested Mountain Region Using TRIGRS Model. *Journal of Mountain Science*, 7(1), pp.83-91.

Kohavi, R.; Provost, F. (1998) Special Issue on Applications of Machine Learning and the Knowledge Discovery Process. *Machine Learning*, p. 271-274.

Konecny, G. (2014). *Geoinformation: Remote Sensing, Photogrammetry and Geographic Information Systems*, Second Edition. CRC Press, p.472. ISBN: 9781420068566

Liao, Z., Hong, Y., Kirschbaum, D., Adler, R. F., Gourley, J. J., & Wooten, R. (2011). Evaluation of TRIGRS (transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis)'s predictive skill for hurricane-triggered landslides: a case study in Macon County, North Carolina. *Natural hazards*, 58(1), pp.325-339.

Lopes, M. (2015). *Aplicação de VANT em estudos geomorfológicos dos litorais rochosos: o exemplo de S. Paio, Vila do Conde*. Faculdade de Letras da Universidade do Porto, p.105. Disponível em: [https://sigarra.up.pt/flup/pt/pub\\_geral.show\\_file?pi\\_gdoc\\_id=476536](https://sigarra.up.pt/flup/pt/pub_geral.show_file?pi_gdoc_id=476536)

Lucieer, A., Turner, D., King, D., & Robinson, A. (2014). Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to capture micro-topography of Antarctic moss beds. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 27 p.53–62. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.011>

Marques, R. (2013) - Estudo de movimentos de vertente no concelho da Povoação (ilha de São Miguel, Açores): Inventariação, caracterização e análise da susceptibilidade. Tese de Doutoramento no Ramo de Geologia, especialidade Riscos Geológicos. Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 456

Martins, C. (2015). Avaliação da Suscetibilidade à Ocorrência de Movimentos de Vertente na Bacia Hidrográfica da Meia Léguas: Modelação Estatística e Simulação Matemática de Base Física. Porto: Dissertação de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território apresentada à Faculdade de Letras da Universidade do Porto.

Meisina, C.; Scarabelli, S. (2007) - A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils. *Geomorphology*. Vol. 87. n.º 3, pp. 207-223. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000251891800008>. 0169-555X

Mesquita, Freitas, M., G., B., F.,; Moraes, S., O., (2004) - A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ciencia Rural*. Vol. 34, nº3. pp. 963-969.

Micheletti, N., Chandler, J.H. and Lane, S.N., (2015) - Structure from motion (SFM) photogrammetry. IN: Clarke, L.E. and Nield, J.M. (Eds.) *Geomorphological Techniques* (Online Edition). London: British Society for Geomorphology. ISSN: 2047-0371, Chap. 2, Sec. 2.2.

Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1989). Source areas, drainage density, and channel initiation. *Water Resources Research*. Vol. 25. n.º 8. pp. 1907-1918. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/WR025i008p01907>

Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*. Vol. 30. n.º 4. pp.1153-1171. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/93WR02979>

Novo, E.M.L.M. e Ponzoni, F. J., (2001). Introdução ao Sensoriamento Remoto. São José dos Campos: Instituto Nacional de pesquisas Espaciais, Divisão de Sensoriamento Remoto.

O'Loughlin, E. M. (1986). Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis. *Water Resources Research*, 22(5), 794-804. doi:10.1029/WR022i005p00794

Oliveira, A. (2014). Avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente no vale do Douro (Quinta das Carvalhas). Influência dos MDE's na modelação matemática de base física e estatística. (Dissertação de Mestrado), Universidade do Porto, Porto.

Oliveira, A. S.; Bateira, C.; Soares, L.; Faria, A.; Fernandes, J.; Teixeira, M.; Hermenegildo, C. (2014) - MODRIS: Suscetibilidade a processos hidrogeomorfológicos no Norte de Portugal: modelação matemática de base física e de base estatística. Porto: Letras Departamento de Geografia Física

Oliveira, R. A.; Tommaselli, A. M. G. (2012) Geração automática de Modelos Digital de Superfície utilizando múltiplas imagens. In: III Simpósio Brasileiro de Geomática, 2012, Presidente Prudente. Anais... Presidente Prudente: III SGB, 2012. v. 1. p. 193-198.

Ouédraogo, M., Degré, A., Debouche, C., & Lisein, J. (2014). The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds, *Geomorphology*, Volume 214, p. 526.

Pack, R. T., D. G. Tarboton & C. N. Goodwin. (1998). Terrain Stability Mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.00. Report Number 4114-0, Terratech Consulting Ltd., Salmon Arm, B.C., Canada. Disponível em: <http://hydrology.uwrl.usu.edu/sinmap2/>

Pack, R. T.; Tarboton, D. G.; Goodwin, C. N. (2001) - Assessing Terrain Stability in a GIS using SINMAP. In: ANNUAL GIS CONFERENCE, 15. Vancouver, British Columbia, 2001, p. 19-22.

Paine, P., D.; Kiser, D., J., (2012) - Aerial Photography and Image Interpretation. ISBN: 978-0-470-87938-2. 648 pages. February 2012

Pereira, S.; Zezere, J. L.; Quaresma, I. D.; Bateira, C. (2014) - Landslide incidence in the North of Portugal: Analysis of a historical landslide database based on press releases and technical reports. *Geomorphology*. Vol. 214. pp. 514-525. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000336345700038>. 0169-555X

Pereira, G., H., A., (2013) - Avaliação do uso combinado de métodos de modelagem da direção do escoamento superficial e modelos digitais de superfície derivados de laser scanner em regiões urbanas. Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental

Pimenta, R., S., G., (2011) - Avaliação da susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertente com métodos de base física. Tese de mestrado em Geologia do Ambiente (Riscos Geológicos e Ordenamento do Território), apresentada à Universidade de Lisboa, através da Faculdade de Ciências, 2011

Pinheiro, H.S.K.; Chagas, C. da S.; Carvalho-Júnior, W. de; Anjos, L.H.C. dos. Modelos de elevação para obtenção de atributos topográficos utilizados em mapeamento digital de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.47, p.1384-1394, 2012. DOI: 10.1590/S0100-204X2012000900024.

Puecker T. K., R. J. FOWLER, J. J. LITTLE, and D. M. MARK,(1978) - The Triangulated Irregular Network. ASP Proceedings of Digital Terrain Models(DTM) Symposium, St. Louis, Missouri, pp. 516-540

Popescu, M. (2002) - Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options. Keynote Lecture, Proceedings 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures, Singapore: 61-81

Qin, C.Z., Zhan, L., (2012) Parallelizing Flow-Accumulation Calculations on Graphics Processing Units—From Iterative DEM Preprocessing Algorithm to Recursive Multiple-Flow-Direction Algorithm. Computers & Geosciences, Vol. 43, 2012.

Quinn, P. et al. (1991) The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. Hydrological Processes, v. 5, n. 1, p. 59-79.

Rebelo, F. (2001) – “Terceira edição de um clássico sobre riscos”. Territorium, 8, p. 109

Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, T. P., & Troisi, S. (2012). Low-Cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation – A Critical Overview. In M. Ioannides

Rodrigues, D. (2005) - Análise de Risco de Movimentos de Vertente e Ordenamento do Território na Madeira.

Aplicação ao caso de Machico. Tese de Doutoramento em Geologia, Universidade da Madeira, Funchal.

Rotaru, A.; Oajdea, D. & Răileanu, P. (2007) - Analysis of the Landslide Movements. International Journal of Geology, Ed. 3; Vol. 1: 70-79.

Seibert, J., McGlynn, B.L. (2007). A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope áreas from gridded digital elevation models. Water Resources Research, 43, W04501, doi:10.1029/2006WR005128.

Selby, M. J. (1993) - Hillslope: Materials and Processes. Oxford, Eglan

Silva, D. C.; Toonstra, G. W. A.; Souza, H. L. S.; Pereira, T. A. J. (2014) - Qualidade de Ortomosaicos de Imagens de Vant processados Com os Softwares APS, PIX4D E PHOTOSCAN. In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 5, Recife-PE.

Silva, A. F., (2005) – Litostratigrafia e Estrutura do Supergrupo Dúrico-Beirão (Complexo Xisto-Grauváquico). Inst. Nac. Eng. Tec. Inov., Lisboa, 480 pp.

Snavely, N., Seitz, S.N., Szeliski, R., (2008). Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision* 80, 189–210.

Soares, L. (2008) - A importância das formações superficiais no âmbito dos processos de erosão hídrica e movimentos de vertente no NW de Portugal. Dissertação (Doutoramento) – Faculdade de Letras, Universidade do Porto, Porto, 2008.

Sousa, M. B. (1982) Litoestratigrafia e estrutura do CXG-Grupo do Douro. Tese (Doutoramento) – Universidade de Coimbra, Coimbra.

Tarboton, D. G. (1997) A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, v. 33, n. 2, p. 309-319, 1997.

Terzaghi, K. (1953) - Mecanismo dos escorregamentos de terra. Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, separata nº467, São Paulo.

Tommaselli, A., (2009) - Fotogrametria Básica - Introdução. Capítulo 1 e 2.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.

Verhoeven, G., Sevara, C., Karel, W., Ressler, C., Doneus, M., & Briese, C. (2013). Good Practice in Archaeological Diagnostics. pp.31-67. In Springer, 2013. 3 -Undistorting the past: new techniques for orthorectification of archaeological aerial frame imagery. doi: 10.1007/978-3-319-01784-6\_3

Vieira, B. C. (2007). Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas. (Tese de Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Wehr, A., and U. Lohr, (1999) - "Airborne Laser Scanning—An Introduction and Overview," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54, No. 2-3, pp. 68-82. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00011-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00011-8)

Westen, C. J. van; Asch, T. W. J.; Soeters, R. (2006) - Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Vol. 65. n.º 2. pp. 167-184. Disponível em WWW: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>>. 1435-9529

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience



applications. *Geomorphology*, 179, 300-314. doi: Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

Wolf, P., DeWitt, B., & Wilkinson, B. (2013). *Elements of Photogrammetry with Application in GIS*, Fourth Edition. McGraw Hill Professional, p.640. ISBN: 9780071761116

Working Party on World Landslide Inventory, WP/WLI (1993). A suggested method for describing the activity of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*

WRB (2006) - World reference base for soil resources: A framework for international classification, correlation and communication.

Wu, Weimin, & Sidle, Roy C. (1995). A Distributed Slope Stability Model for Steep Forested Basins. *Water Resources Research*, 31(8), 2097-2110. doi: 10.1029/95WR01136. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/95WR01136>

Zêzere, J. L. (1997). *Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa*. Lisboa: Dissertação de doutoramento em Geografia Física apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa.

Zêzere, J. L. (2005). *Dinâmica de vertentes e risco geomorfológico*. Centro de Estudos Geográficos, Relatório n.º41, Lisboa

Zêzere, J. L. (2014) Disaster: a GIS database on hydro-geomorphologic disasters in Portugal. *Natural Hazards*, v. 72, n. 2, p. 503-532.

# ANEXOS



**Amperímetro. (Resistividade elétrica)**



**Grampos - Amperímetro. (Resistividade elétrica)**





**Permeâmetro de Guelph. (Condutividade hidráulica)**



**Quinta do Bomfim. (à esquerda após o rio, Quinta das Carvalhas)**